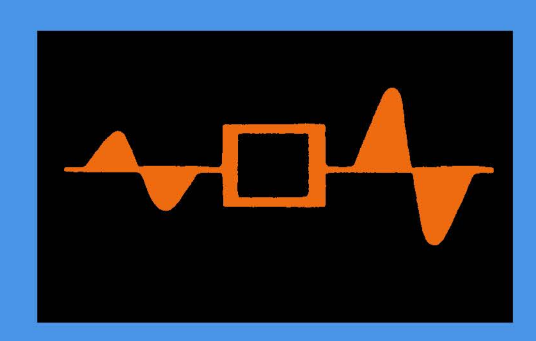
А. И. ХЛУПНОВ



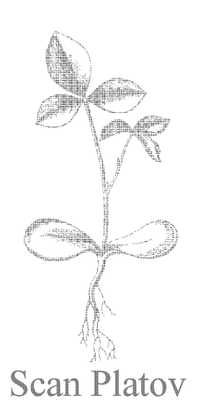
ЛЮБИТЕЛЬСКИЕ УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

МАССОВАЯ
РАДИО —
БИБЛИОТЕКА

Выпуск 915

А. И. ХЛУПНОВ

ЛЮБИТЕЛЬСКИЕ УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ



«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1976

6Ф2.1
Х60
УДК 621.375.029.4

АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ ХЛУПНОВ
ЛЮБИТЕЛЬСКИЕ УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ
Редактор Ю. С. Красов
Редактор издательства Г. Н. Астафуров
Обложка художника Н. А. Князькова
Технический редактор М. Г. Вишневская
Корректор А. Д. Халанская

Сдано в набор 23/II 1976 г. Подписано к печати 20/V 1976 г. Т-11004. Формат 84×108[1]/32. Бумага типографская № 3. Усл. печ. л. 4,2. Уч.-изд. л. 5,52. Тираж 50 000 экз. Зак. 491. Цена 23 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб, 10

Владимирская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
600610, г. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.

Хлупнов А. И.
Х60 Любительские усилители низкой частоты. М., «Энергия», 1976.

80 с. с ил. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 915)

В книге описываются конструкции любительских усилителей низкой частоты и даются рекомендации по их изготовлению и налаживанию
Книга рассчитана на радиолюбителей-конструкторов.

$Х \frac{30404-428}{051(01)-76}$ 190-76 6Ф2.1

ПРЕДИСЛОВИЕ

Создание высококачественных звуковоспроизводящих устройств является в настоящее время одним из самых популярных увлечений радиолюбителей. Наличие в продаже широкого ассортимента различных узлов и деталей позволяет радиолюбителям создавать такие устройства, причем не только стереофонические, но и квадрафонические, которые приближаются по своим характеристикам к промышленным образцам усилителей.

Однако наметившаяся в последнее время тенденция усложнения любительских конструкций не оправдана. Очевидно, что при создании любительской конструкции наиболее оптимальным является метод комплектования ее из отдельных узлов или блоков с известными параметрами. Предпочтение следует отдавать тем конструкциям, которые позволяют получить требуемые параметры без предварительного отбора элементов и не требуют для настройки высокоточных измерительных приборов.

Такой подход к конструированию любительских звуковоспроизводящих устройств объясняется прежде всего тем, что не каждый радиолюбитель обладает достаточным опытом и квалификацией, чтобы самостоятельно рассчитать, изготовить и наладить усилитель. Кроме того, современные высококачественные усилители низкой частоты обладают настолько высокими показателями, что для их настройки требуется прецезионная измерительная аппаратура, которая далеко не часто имеется даже в лабораториях.

В имеющейся литературе по высококачественным усилителям уделялось значительное внимание ламповым и транзисторным конструкциям относительно небольшой мощности. К тому же эти конструкции были рассчитаны на повторение подготовленными радиолюбителями. В настоящее время в любительских условиях хороший усилитель проще изготовить на транзисторах. Именно такие усилители и рассматриваются в настоящей книге. Они содержат радиодетали, имеющиеся в широкой продаже, и рассчитаны на повторение радиолюбителями без применения высокоточных измерительных приборов.

Автор будет признателен читателям, которые выскажут свои замечания по книге, направив их по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, изд-во «Энергия», редакция Массовой радиобиблиотеки.

Автор

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При создании любительского высококачественного усилителя низкой частоты сначала должен быть определен круг параметров, которым он должен соответствовать. Очевидно, что за основу при выборе характеристик конкретной любительской конструкции и отдельных блоков надо исходить из требований ГОСТ 11515-65, 11157-65, 12392-71 для усилителей высшего и первого классов. Кроме того, полезно ознакомиться с характеристиками некоторых усилителей, отвечающих требованиям так называемого «стандартного класса» Hi-Fi. В мировой практике выражение Hi-Fi, которое является сокращенным от High fidelity sound, т. е. «высокая верность звука», стало синонимом высоких электроакустических характеристик звуковоспроизводящей аппаратуры. Для примера характеристики некоторых усилителей приведены в табл. 1.

Основной характеристикой усилителя, которая вызывает наибольшие споры, является его выходная мощность. Этот вопрос не должен решаться отвлеченно. Любительский усилитель создается для работы в определенном помещении. Из требований акустики вытекают определенные соотношения между площадью озвучиваемого помещения и номинальной выходной мощностью усилителя. Для закрытых помещений в качестве ориентировочных можно принять следующие нормы [8]: 0,7 Вт на каждые 10 м^2 жилой площади для квадратных помещений и при расположении источника звука в углу комнаты и 0,5—0,6 Вт на каждые 10 м^2 для прямоугольных помещений, в которых источник звука установлен посередине меньшей стены. Указанные данные для мощности усилителя приведены на частоте 1000 Гц. Если в усилителе имеются регуляторы тембра, обеспечивающие подъем частотной характеристики на низших и высших частотах, то усилитель должен обладать такой мощностью, чтобы при этом подъеме он не вносил искажений во всей полосе воспроизводимых частот.

Например, если озвучивается помещение площадью 20 м^2, то требуемая мощность усилителя на частоте 1000 Гц при втором варианте расположения источника звука составляет $0{,}5\times20/10=1$ Вт.

Значения рекомендуемых мощностей приведены из расчета использования усилителя в помещении, где отсутствуют всякого рода звукопоглощающие предметы, а акустические агрегаты имеют к. п. д. не ниже 15—20%. При озвучивании такого помещения с помощью стереофонического усилителя, очевидно, мощность каждого канала будет вдвое меньше, т. е. по 0,5 Вт. При наличии регуляторов тембра с пределами регулирования ±14 дБ должна обеспечиваться неискаженная мощность в 25 раз больше, т. е. для каждого канала усилителя это составит $0{,}5\times25=12{,}5$ Вт. Если регуляторы тембра имеют большие пределы регулирования, то соответственно требуется и большая выходная мощность каждого канала усилителя.

Тип усилителя	Страна-изготовитель	Выходная мощность, Вт (при $R_н$, Ом)	Коэффициент нелинейных искажений, %	Рабочая полоса частот, Гц, неравномерность частотной характеристики, дБ	Стандартные входы, мВ/МОм, и относительный уровень шумов, дБ	Переходное затухание между каналами, дБ	Фактор демпфирования
Электроника Б1-02	СССР	2×70(4)	<0,2	10—60 000±1	5,0/0,047—70; 250/0,47; 2,5/0,015	—	—
Электроника-001 Стерео	СССР	2×15	<1	20—20 000	—60	—	—
Юпитер-квадро	СССР	4×27(8)	<1	30—20 000±2	60/0,005	—	—
Lafayette La-25	США	2×10(8)	<1	20—20 000±1,5	3,5/0,047;—55; 150; —65	55	—
Victor MCA-5	Япония	2×25(8)	—	20—100 000 ±0,5	2,0/0,05;—70; 160/0,05;—80	—	—
Victor MCA-3	Япония	2×44(8)	—	18—100 000 ±1	2,0/0,05;—70; 5,0/0,05;—68; 180/0,05;—80	—	—
Victor DF-11	Япония	4×15(8)	<0,8	20—60 000—3	1,0—3,0/0,05; —60	—	—
Pioneer SA-500A	Япония	2×10(8)	<0,5	20—40 000	2,5; —75; 200	—	40
Sony TA-1150	Япония	40	<0,2	8—35 000	2,0; —70; 140	—	100
Revox A-78	США	40	<0,3	10—40 000	2,0; —80	—	20

Таблица 2

Источник сигнала	Входное сопротивление усилителя, кОм	Уровень входного сигнала
Пьезоэлектрический звукосниматель	⩾470	0,1—0,5 В
Электромагнитный звукосниматель	47	2—10 мВ
Линейный выход магнитофона	⩾10	0,25—0,5 В
Трансляция	⩾10	10—30 В
Выход радиоприемника	⩾25	10—30 мВ

Однако чрезмерное увеличение выходной мощности усилителя при ограниченных размерах помещения неоправданно. Кроме того, с ростом мощности усилителя при сохранении отношения сигнал/шум постоянным увеличивается абсолютная величина напряжения шумов на выходе усилителя. Например, если у усилителя мощностью 10 Вт собственные шумы на выходе составляют 4 мВ, то в усилителе мощностью 40 Вт их величина уже будет 8 мВ, и если слушатель располагается на одинаковом расстоянии от звуковых колонок, то возможно даже некоторое ухудшение впечатления от работы усилителя из-за прослушивания его собственных шумов в паузах.

Следующим параметром усилителя, который определяет качество его работы, является отношение сигнал/шум (при закороченном входе) или напряжение собственных шумов усилителя на выходе. Для любительских усилителей допустимо, чтобы собственные шумы не были слышны на расстоянии 1—2 м от звуковых колонок. Совершенно обязательным для любительских систем является то, чтобы фон переменного тока не прослушивался на расстоянии 0,2—0,3 м. Остальные характеристики можно использовать по данным таблицы.

При создании высококачественного любительского усилителя низкой частоты вполне достаточно обеспечить условия, при которых нелинейные искажения не превышают 1%.

Большое внимание надо уделять уменьшению выходного сопротивления оконечного усилителя. Желательно, чтобы оно было ниже сопротивления нагрузки не менее чем в 3—5 раз.

Выбор функциональной схемы усилителя определяется типом и видом источников электрического сигнала, на совместную работу с которыми он рассчитан. В соответствии с ГОСТ 12392-71 входные устройства усилителя должны отвечать требованиям табл. 2.

В связи с тем что уровни выходных сигналов могут отличаться в 100 раз и более, то, очевидно, оптимальной будет следующая функциональная схема одного канала усилителя (рис. 1). При работе с источниками с низкими уровнями сигналов (магнитная головка звукоснимателя, магнитная головка магнитофона) используется дополнительный предварительный усилитель *1* с необходимой частотной коррекцией, вид которой определяется источником электрического сигнала. Электрические сигналы больших уровней (пьезоэлектрический звукосниматель, линейный выход магнитофона) поступают непосредственно на регулятор уровня, а затем уже на входное устройство предварительного усилителя *4*. Такое построение усилителя позволяет улучшить отношение сигнал/шум.

Известно, что уровень выходного сигнала, развиваемого пьезоэлектрическим звукоснимателем, и его частотная характеристика зависят от нагрузки, на которую он работает, причем чем меньше сопротивление нагрузки, тем ниже уровень выходного сигнала (особенно на низких частотах).

В современных любительских конструкциях, предназначенных для совместной работы с пьезоэлектрическим звукоснимателем чаще применяют предварительные усилители, имеющие линейную частотную характеристику; входное сопротивление таких усилителей от

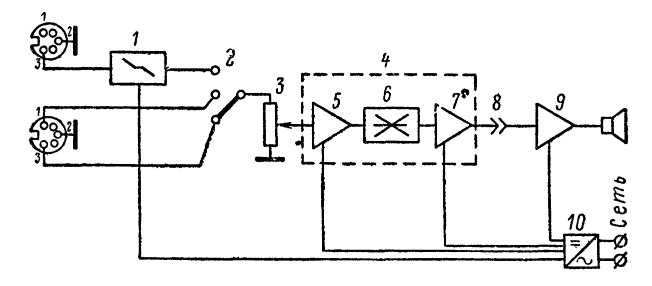


Рис. 1. Функциональная схема одного канала усилителя.

1 — дополнительный предварительный усилитель с частотной коррекцией; *2* — переключатель источников сигнала; *3* — регулятор уровня; *4* — предварительный усилитель; *5* — входное устройство; *6* — регуляторы тембра НЧ и ВЧ; *7* — усилитель; *8* — разъем для подключения дополнительных устройств; *9* — оконечный усилитель; *10* — блок питания.

50 кОм и выше. В этом случае трудно достигнуть линейной частотной характеристики тракта грампластинка — звукосниматель — усилитель, не вводя дополнительных частотно-корректирующих звеньев. Последнее время стали использовать включение пьезоэлектрического звукоснимателя по схеме «короткого замыкания» (входное сопротивление усилителя около 3 кОм). Такое включение дает возможность срезать пики на частотной характеристике звукоснимателя. Для компенсации резкого снижения выходного сигнала (до 10 мВ) используют дополнительный предварительный усилитель с частотной коррекцией, что обеспечивает линейную частотную характеристику звуковоспроизводящего тракта при проигрывании тестовых грампластинок. К преимуществам данной схемы включения следует отнести то, что этот дополнительный предварительный усилитель можно использовать совместно с электромагнитной головкой без изменения его частотной характеристики. Однако рассмотренное включение пьезоэлектрического звукоснимателя приводит соответственно к ухудшению отношения сигнал/шум.

В любительских условиях целесообразнее применять схему включения, получившую название «холостого хода». Для этого входной каскад выполняется по схеме эмиттерного повторителя с входным сопротивлением не менее 470 кОм.

При таком включении линейность частотной характеристики тракта грампластинка — звукосниматель — усилитель может быть достигнута с помощью регуляторов тембра *6* (см. рис. 1), входящих в состав предварительного усилителя. Одновременно значительно

улучшается отношение сигнал/шум, так как уровень входного сигнала не менее 100 мВ и дополнительного усиления не требуется.

Входное устройство *5*, регуляторы тембра *6* и усилитель *7* (см. рис. 1) обычно выполняют в виде одного функционального блока, который называют предварительным усилителем или усилителем напряжения. Этот блок должен обеспечить возможность подключения различных источников сигналов, требуемый диапазон регулировки тембра не менее ±14 дБ и необходимое усиление электрического сигнала для нормальной работы оконечного усилителя.

Между предварительным и оконечным усилителями следует предусмотреть возможность подключения дополнительных устройств, таких, как ограничитель шумов в паузах, многоканальный регулятор тембра, экспандер и др.

Выбор схемы оконечного усилителя определяется необходимой мощностью, частотным диапазоном, величиной фактора демпфирования и т. д. (см. табл. 1). Кроме того, должны предусматриваться конструктивные меры, позволяющие стабилизировать ток покоя оконечных транзисторов при изменении их температуры, а также стабилизация напряжения в средней точки при двухтактной схеме включения выходных транзисторов. Желательно также иметь защиту от перегрузок и короткого замыкания в нагрузке.

С целью улучшения качества работы громкоговорителя на низших частотах возможно введение в оконечный усилитель электродинамической обратной связи.

Акустическая система выбирается исходя из того, что номинальная мощность установленных громкоговорителей должна быть в 1,5—2,0 раза больше номинальной мощности усилителя. Это позволяет уменьшить нелинейные искажения при пиковых нагрузках. С целью уменьшения интермодуляционных искажений желательно использовать отдельные громкоговорители для низких и высоких частот, а для разделения частотного диапазона устанавливать фильтры.

При проектировании и изготовлении стабилизированного полупроводникового блока питания следует учитывать особенности эксплуатации любительского усилителя. Если он предназначен для прослушивания музыкальных программ в жилой комнате, то его режим работы будет характеризоваться малой средней мощностью (0,5—1 Вт на 1 канал). В этом случае потребляемый от блока питания ток будет мало отличающимся от тока покоя. В таком режиме блок питания должен обеспечивать малые пульсации питающего напряжения.

Стабилизация напряжения питания не является необходимой.

Для предохранения регулирующих транзисторов блока питания от выхода из строя в случае короткого замыкания предусматривается электронная защита или ограничители тока (в простейшем случае плавкие предохранители).

При разработке стереофонического усилителя необходимо решить вопрос об органах регулировки. Регуляторы тембра выполняют обычно на базе спаренных переменных резисторов. Для регулировки уровня также используют спаренный переменный резистор (тип В). На входе оконечного усилителя устанавливают регулятор стереобаланса, с помощью которого добиваются одинаковых выходных сигналов в обоих каналах. В любительских усилителях можно применить в каждом канале отдельный регулятор уровня. Если же у радиолюбителя нет переменных резисторов типа В, а есть резисторы типа А,

то для обеспечения необходимого диапазона регулировки уровня придется установить их два: спаренный на входе предварительного усилителя напряжения и отдельные на входе оконечных усилителей (рис. 2). Последние позволяют осуществлять также регулировку стереобаланса. В этом случае необходимо иметь три ручки управления.

В квадрафоническом усилителе возможно использование схемы, аналогичной показанной на рис. 2, т. е. на входе устанавливают

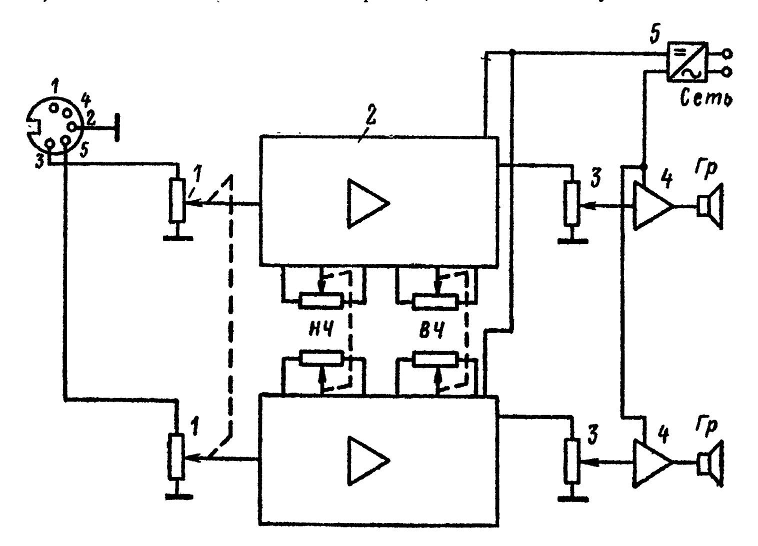


Рис. 2. Схема включения органов управления стереофонического усилителя.

1 — спаренный регулятор уровня; *2* — предварительный усилитель со спаренными регуляторами тембра НЧ и ВЧ; *3* — переменные резисторы (регуляторы стереобаланса); *4* — оконечный усилитель; *5* — блок питания.

счетверенный блок переменных резисторов для предотвращения перегрузки входных каскадов, а для регулировки стереобаланса используют уже четыре отдельных переменных резистора на входе оконечных усилителей.

После того как определены основные характеристики усилителя, вид источников сигнала и функциональная схема, переходят к выбору конкретных схем отдельных блоков усилителя.

ОКОНЕЧНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

При выборе схемы оконечного усилителя следует учитывать требования и характеристики, приведенные выше, а также следующие рекомендации [3, 4].

1. Предпочтительнее использовать схемы усилителей с непосредственной связью между каскадами (усилители постоянного тока с автоподстройкой режима). Такие схемы обеспечивают более высо-

кую эффективность использования транзисторов, лучшую частотную, фазовую и амплитудную характеристики по сравнению со схемами, содержащими переходные и блокирующие конденсаторы большой емкости.

2. Усилитель лучше строить по автобалансной схеме с изолированными полюсами источника питания и заземленной динамической средней точкой. Такое построение обеспечивает хорошую устойчивость с минимальным числом развязок по цепям питания и более широкий динамический диапазон усилителя при максимальной выходной мощности. Схема позволяет также питать оконечный усилитель от простейшего выпрямителя со значительными пульсациями.

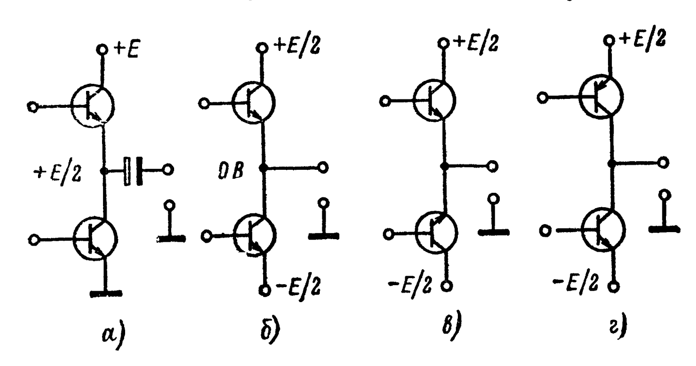


Рис. 3. Схема выходных каскадов оконечных усилителей.

3. Звуковую катушку громкоговорителя лучше включать в диагональ моста, образованного плечами выходного каскада усилителя, последовательно соединенными блокировочными конденсаторами. Такая схема более эффективно уменьшает динамическое сопротивление опорной точки включения громкоговорителей.

4. Для получения низкого выходного сопротивления и малых нелинейных искажений усилителя необходима глубокая отрицательная связь по переменному напряжению.

5. В схеме должна быть предусмотрена жесткая стабилизация тока покоя и постоянного напряжения на выходе усилителя.

Рассмотрим, как учитывают рассмотренные требования и параметры при выборе схемы оконечного транзисторного усилителя и ее элементов.

Значительная выходная мощность усилителя диктует необходимость применять в выходных каскадах двухтактную схему (рис. 3). В любительских конструкциях наиболее широко используют схему, показанную на рис. 3, *а*. К основному недостатку такой схемы следует отнести наличие на выходе разделительного (блокировочного) конденсатора, который ограничивает частотный диапазон усилителя в области низких частот. Если этот конденсатор имеет емкость 2500 мкФ, а сопротивление нагрузки 8 Ом, то на частоте 20 Гц на конденсаторе гасится около $^1/_3$ выходной мощности, а при нагрузке 4 Ом — почти половина. Это также ухудшает фактор демпфирования (под фактором демпфирования понимают отношение сопротивления нагрузки к выходному сопротивлению усилителя). На сред-

них и высоких частотах можно достичь значения фактора демпфирования усилителя до 100 (в зависимости от сопротивления применяемых головок), но на частоте 20 Гц при емкости конденсатора 2500 мкФ фактор демпфирования будет только 2,5. Кроме того, при такой схеме выходного каскада усилителя вызывает значительные трудности стабилизация положения средней точки. Блок питания выполняют по более простой схеме, но при этом применяют электролитические конденсаторы фильтра на вдвое большее напряжение, чем для схем на рис. 3, *б — г*.

В большинстве отечественных высококачественных усилителей низкой частоты применяется схема выходных каскадов с заземленной динамической средней точкой (см. рис. 3, *б — г*). Если оконечный усилитель собран по схеме с непосредственной связью между каскадами, то нижняя граничная частота при таком включении нагрузки ограничивается только емкостью конденсатора, установленного на входе усилителя. Для такой схемы значительно легче выполнить указанные выше требования и получить большие значения фактора демпфирования на низших частотах.

Для обеспечения симметрии обоих плеч выходного каскада лучше использовать выходные транзисторы разной проводимости (см. рис. 3, *в* и *г*). Однако если нет возможности подобрать такую пару, предпочтение следует отдавать кремниевым транзисторам типа *n-p-n* (см. рис. 3, *б*).

Как известно, для бестрансформаторных транзисторных схем оконечных усилителей существует однозначная зависимость между выходной мощностью P, сопротивлением нагрузки $R_н$ и напряжением питания E. Значение напряжения, развиваемого на нагрузке для обеспечения этой мощности, определится из выражения

$$U_н = \sqrt{PR_н}. \qquad (1)$$

Для приближенных расчетов можно принять, что величина неискаженного выходного сигнала равна:

$$U = 0,25E,$$

но так как $U = U_н$, то

$$E = 4U_н. \qquad (2)$$

Это допущение основывается на том, что в выходных каскадах оконечного усилителя не происходит усиления сигнала и его величина полностью определяется режимом работы предварительного усилительного каскада, включенного по схеме с общим эмиттером (ОЭ). Как известно, при таком включении максимальная величина неискаженного сигнала не может быть больше, чем $E/3$. Это справедливо при условии отсутствия резистора в цепи эмиттера. В реальных схемах для обеспечения стабилизации режимов в цепь эмиттера включают резистор. Из выражений (1) и (2) получаем зависимость для вычисления необходимого напряжения питания оконечного усилителя:

$$E = 4\sqrt{PR_н}. \qquad (3)$$

Например, если $R_н=8$ Ом, а $P=10$ Вт, то

$$E = 4\sqrt{10\cdot 8} \approx 36\ \text{В}.$$

Для выбора типа выходных транзисторов необходимо определить максимальную мощность, рассеиваемую каждым транзистором,

$$P_{к\cdot макс} = E^2/(4\pi^2 R_н) \tag{4}$$

и максимальный импульс коллекторного тока

$$I_{к\cdot макс} = E/(2R_н). \tag{5}$$

Для рассматриваемого примера

$$P_{к\cdot макс} = \frac{36^2}{4\pi^2\cdot 8} = 4,1\ \text{Вт};$$

$$I_{к\cdot макс} = \frac{36}{2\cdot 8} = 2,25\ \text{А}.$$

На выбор типа оконечных транзисторов оказывает влияние также и частотный диапазон усилителя. С целью уменьшения искажений на высоких частотах и предотвращения роста потребления тока на этих частотах следует выбирать транзисторы, у которых граничная частота при включении по схеме с ОЭ или ОК (общим коллектором) была больше верхней граничной частоты усилителя $f_в$. Так как существует зависимость

$$f_\beta = f_\alpha/(1+\beta_0), \tag{6}$$

где f_α, f_β — предельные частоты усиления транзистора соответственно при включении по схеме с ОБ и ОЭ; β_0 — коэффициент усиления по току в схеме с ОЭ, то

$$f_\alpha \geqslant (1+\beta_0)\, f_в, \tag{7}$$

откуда принимаем $f_в=f_\beta$.

Если верхняя граничная частота усилителя $f_в=30$ кГц, а $\beta_0=15$, то необходимо в усилителе использовать транзистор с $f_\alpha \geqslant (1+15)\cdot 30\cdot 10^3=0,48$ МГц.

Так как в выходном каскаде всегда используют составные транзисторы, позволяющие уменьшить его выходное сопротивление, то следует учесть, что частотные свойства такого составного транзистора будут хуже, чем каждого из входящих в его состав транзисторов. В связи с этим лучше использовать транзистор с вдвое большим значением граничной частоты f_α по сравнению с рассчитанным по формуле (7). Но и в случае, когда транзистор выбирается с $f_\beta=f_в$, имеет место увеличение постоянной составляющей тока покоя на 30—50% на частоте $f_в$ по сравнению с потребляемым током на частоте 200 Гц [15].

На основе приведенных расчетов транзистор, устанавливаемый в выходном каскаде рассчитываемого усилителя, должен удовлетворять следующим требованиям:

$$f_\alpha \geqslant 1,0\ \text{МГц};\quad P_{к\cdot макс} > 4,1\ \text{Вт};\quad I_{к\cdot макс} > 2,25\ \text{А};\quad E_к = 36\ \text{В}.$$

Этим требованиям соответствуют транзисторы типов КТ801, КТ802, КТ803, КТ805, КТ808, КТ903, ГТ804, ГТ806, ГТ703 [16].

Размеры радиаторов, на которые следует устанавливать выходные транзисторы, можно рассчитать по формулам и номограммам в [2].

Вычисленные значения $P_{к.макс}$, $I_{к.макс}$, E и $f_в$ позволяют рассчитать параметры, которым должны удовлетворять предоконечные транзисторы. Учитывая, что предельная частота усиления предоконечных транзисторов $f_{βп} \geqslant 5f_в$, и используя равенство (7), получаем

$$f_{αп} \geqslant 5\,(1+β_{0п})\,f_в. \qquad (8)$$

Соответствующие значения максимального импульса коллекторного тока $I_{к.п}$ и мощности рассеивания $P_{к.п}$ предоконечными транзисторами можно принять равными

$$I_{к.п} = I_{к.макс}/β_{0мин}; \qquad (9)$$

$$P_{к.п} = P_{к.макс}/β_{0мин}, \qquad (10)$$

где $β_{0мин}$ — минимальное значение коэффициента усиления по току оконечных транзисторов.

Если в качестве оконечного применяем транзистор типа КТ802А с $β_{0мин} = 15$, то для рассматриваемого примера

$$I_{к.п} = 2{,}25/15 = 0{,}15\ А;$$

$$P_{к.п} = 4{,}1/15 = 0{,}275\ Вт;$$

при $β_{0п} = 20$ имеем:

$$f_α \geqslant 5\cdot(1+20)\cdot 30\,000 = 3{,}15\ МГц.$$

Следовательно, этим данным удовлетворяют среднечастотные транзисторы средней мощности типов П601, П602, П605, КТ602, КТ605, КТ801, КТ807, ГТ402, ГТ404 и др. [16].

Если в результате расчета окажется, что $P_{к.п}$ больше, чем допустимая мощность рассеивания выбранным транзистором без теплоотвода, то его необходимо установить на радиаторе.

Данный приближенный расчет приведен для случая, когда оконечные транзисторы работают в режиме В. Однако из-за нелинейности переходной характеристики транзисторов при малых токах имеют место искажения типа ступеньки. Для устранения этих искажений устанавливают некоторый начальный ток, который проходит через выходные транзисторы и в режиме покоя. Значение этого тока обычно выбирают из условия

$$I_{нач} = (0{,}01 \div 0{,}02)\,I_{к.макс}. \qquad (11)$$

Начальный ток зависит как от напряжения питания усилителя, так и от типа применяемых выходных транзисторов. Если транзисторы германиевые, то этот ток составляет 10—20 мА, а для кремниевых 40—60 мА. При слишком большом начальном токе уменьшается к. п. д. всего усилителя и сильнее нагреваются выходные транзисторы. Например, если в усилителе с напряжением питания

±18 В установлен начальный ток 50 мА, то потребляемая каждым выходным транзистором в холостом режиме мощность равна:

$$P_{нач} = I_{нач} E/2 = 0{,}05 \cdot 18 = 0{,}9 \text{ Вт}. \quad (12)$$

Величина начального тока регулируется изменением напряжения между базами предоконечных транзисторов.

Особое значение при проектировании и изготовлении мощных усилителей имеет его тепловая защита. Под тепловой защитой понимается система поддержания определенного уровня начального тока при изменении температуры выходных транзисторов. Известно,

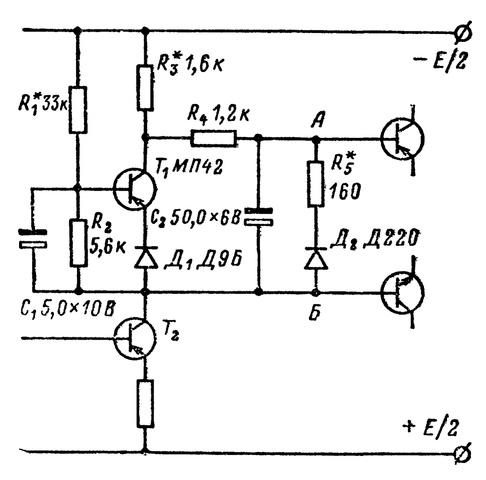


Рис. 4. Схема транзисторного стабилизатора тока покоя оконечных транзисторов.

что если не стабилизировать величину начального тока, то при нагреве выходных транзисторов начальный ток увеличивается при постоянном смещении. Увеличение тока вызывает еще больший нагрев транзисторов и, как следствие, значительное увеличение начального тока. Если этот процесс не будет ограничен, то возможен так называемый тепловой пробой выходных транзисторов. Для предотвращения этого следует уменьшить напряжение смещения между базами транзисторов. Для этого применяют следующие меры. Наиболее широко распространенным является метод закрепления диода, задающего смещение транзисторам выходного каскада, на радиаторах выходных транзисторов. Так как при повышении температуры радиатора сопротивление диода уменьшается, то это вызывает падение напряжения смещения и, следовательно, уменьшение начального тока. Если этот диод установлен на плате усилителя, то он обеспечивает стабилизацию при изменении только окружающей температуры, но эффективность такой температурной стабилизации недостаточна [9], [15]. Также широко используют терморезисторы, которые действуют аналогично диоду. Все эти методы не обеспечивают стабилизации при изменении напряжения питания.

При работе усилителя в широком диапазоне температур применяют более сложные электронные схемы стабилизации тока покоя оконечных транзисторов [9], [15]. Схема такого стабилизатора показана на рис. 4. При изменении напряжения питания разность напряжений между коллекторами транзисторов T_1 и T_2 остается практически постоянной. Это объясняется тем, что, например, при уменьшении E напряжение на базе транзистора T_1 также уменьшается, но на эмиттере оно изменится мало из-за нелинейности характеристики диода $Д_1$. Это вызовет также уменьшение тока коллектора транзистора T_2 и, следовательно, падение напряжения на резисторе R_3, а напряжение между коллекторами транзисторов T_1 и T_2 останется неизменным. При повышении температуры из-за температурной нестабильности коллекторного тока транзистора T_2 и тока диода $Д_1$ это напряжение уменьшается. Кроме того, в этом случае следует учесть уменьшение напряжения смещения за счет падения сопротивления диода $Д_2$. При уменьшении температуры напряжение между точками $А$ и $Б$ увеличивается, вызывая увеличение начального тока. Вместо диода $Д_2$ и резистора R_5 можно установить терморезистор, причем в этом случае стабильность работы усилителя при низких температурах улучшится.

Термокомпенсирующие элементы (диоды, транзистор, терморезистор) необходимо устанавливать на радиаторах мощных выходных транзисторов. Это предохранит от теплового пробоя транзисторы, а также от резкого увеличения тока покоя при низких температурах, возникающего вследствие тепловой инерционности массы радиаторов выходных транзисторов и компенсирующих элементов. Данная схема позволяет стабилизировать ток покоя усилителей в диапазоне температур от —20 до +50° С. Для устранения нежелательных обратных связей по переменному току в схеме установлены конденсаторы C_1 и C_2.

Если не требуется стабилизация тока покоя при изменении напряжения питания, то можно использовать для температурной стабилизации транзистор (рис. 5). Стабилизирующее действие основывается на следующем. Напряжение коллектор — эмиттер транзистора T_1 мало (0,2—1,0 В). При нагреве этого транзистора (если он установлен на радиаторе выходного транзистора) его сопротивление уменьшится, а так как ток через него будет постоянным (определяется током предыдущего каскада усилителя, в коллекторную цепь которого включен терморегулирующий транзистор), то уменьшится и падение напряжения на нем. Уменьшение разности напряжений между точками $А$ и $Б$ вызывает снижение тока покоя оконечных транзисторов.

Как указывалось ранее, схема выходного каскада оконечного усилителя должна предусматривать стабилизацию положения средней точки, т. е. напряжение в точке соединения двух выходных транзисторов (если они правильно подобраны) должно равняться строго половине напряжения питания (схема рис. 3, *а*) или нулю (схема рис. 3, *б — г*).

Нарушение этого условия приводит к уменьшению выходной мощности усилителя, так как в одном из плеч раньше наступает ограничение амплитуды выходного сигнала. В большинстве усилителей, особенно простых радиолюбительских, для этого используют отрицательную обратную связь по постоянному току с выхода усилителя на его вход. В высококачественных усилителях с разделительным конденсатором на выходе вводится специальный усилитель

постоянного тока, включенный в цепь отрицательной обратной связи по току [15]. Для оконечных усилителей с заземленной средней точкой чаще всего его входной каскад выполняют по дифференциальной схеме (рис. 6). Применение в этом случае дифференциального каскада объясняется следующим. Так как нагрузка (громкоговоритель) подключена без разделительного конденсатора, то необходимо постоянно поддерживать на выходе усилителя нулевой потенциал относительно общего провода, иначе через нагрузку будет протекать постоянный ток, что нежелательно. Для этого напряжение глубокой отрицательной обратной связи по току через резистор R_5 подается

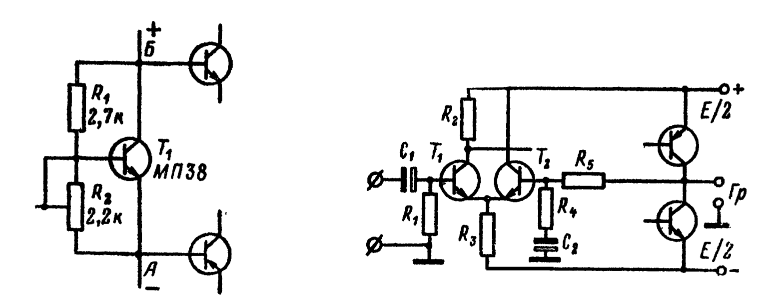


Рис. 5. Схема стабилизации тока покоя с помощью транзистора.

Рис. 6. Схема стабилизации положения средней точки с помощью дифференциального каскада.

на базу транзистора T_2, входящего в дифференциальный каскад. База транзистора T_1 соединена с общим проводом через резистор R_1. Таким образом, в дифференциальном каскаде сравнивается потенциал на выходе усилителя с нулевым потенциалом общего провода. Когда постоянное напряжение на выходе усилителя становится отличным от нуля, на выходе дифференциального каскада появляется сигнал, который усиливается последующими каскадами и подается в противофазе на выход усилителя, приводя схему к равновесию. Кроме того, дифференциальный каскад позволяет значительно снизить влияние температурного дрейфа входных характеристик транзисторов T_1 и T_2 на стабильность потенциала на выходе усилителя.

Для защиты выходных транзисторов от пробоя в случае короткого замыкания в нагрузке и от перегрузки усилителя применяют следующие средства. Обязательным является установка плавки предохранителей в цепях питания. Допустимый ток плавкого предохранителя можно рассчитать по номограмме [5].

Установка диодного ограничителя входного сигнала (рис. 7) между базой и эмиттерным сопротивлением позволяет защитить выходные транзисторы от перегрузки и при подаче сигнала противоположной полярности. Ограничение тока через транзисторы происходит следующим образом. Напряжение, приложенное к диоду $Д_1$ или $Д_2$, складывается из напряжения смещения эмиттерного перехода транзистора и падения напряжения на резисторе, включенном в эмиттерную цепь. При росте тока через транзистор увеличивается и падение напряжения на эмиттерном резисторе, вызывая соответ-

ственно рост напряжения, приложенного в прямом направлении к шунтирующему диоду. Из-за нелинейности прямой ветви вольт-амперной характеристики кремниевого диода $Д_1$ ($Д_3$) увеличение напряжения на нем приводит к резкому уменьшению его динамического сопротивления, которое шунтирует входную цепь транзистора T_1 (T_2), препятствуя увеличению его базового и, следовательно, эмиттерного тока. Сильное шунтирование входной цепи транзистора T_1 (T_2) начинается при напряжении на кремниевом диоде, равном 0,6—0,7 В, которое устанавливается при эмиттерном токе транзистора T_1 (T_2), равном 1,6—1,7 А, если сопротивление резистора

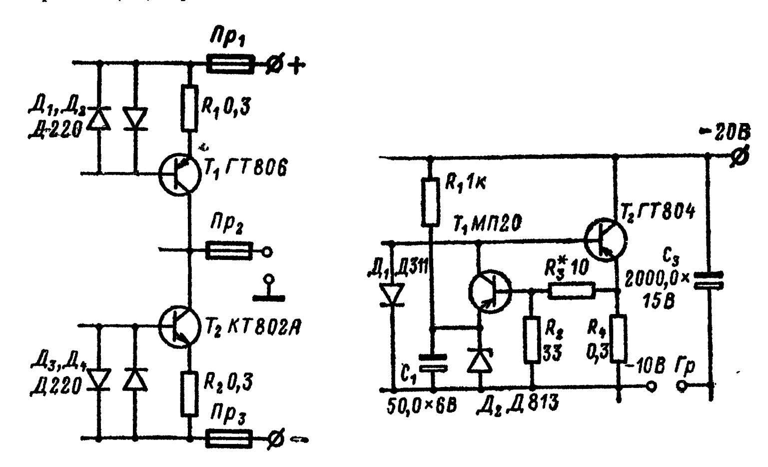


Рис. 7. Схема диодной защиты от перегрузки.

Рис. 8. Схема электронной защиты выходных транзисторов.

R_1 (R_2) 0,3 Ом. Следовательно, в аварийном режиме амплитуда тока эмиттера транзистора T_1 (T_2) не может превышать 1,7 А.

В предоконечном каскаде в случае короткого замыкания ток через транзисторы определяется сопротивлениями резисторов, установленными в коллекторных и эмиттерных цепях (обычно не менее 100—200 Ом).

При использовании в схеме оконечного усилителя диффузионных транзисторов типов П601, ГТ804, ГТ806, которые весьма чувствительны к перегрузкам по току, желательно применение быстродействующей электронной защиты. Один из возможных вариантов такой защиты показан на рис. 8. Так как в выходном каскаде в разных плечах применены одинаковые транзисторы, то показана только половина схемы. В цепь базы выходного транзистора T_2 включен транзистор T_1, который работает в ключевом режиме. Как только ток эмиттера транзистора достигнет 3 А, транзистор T_1 открывается и шунтирует цепь базы выходного транзистора. При применении такой блокировки усилитель нечувствителен к короткому замыканию в нагрузке даже при максимальном сигнале на его входе. Отключение нагрузки также не причиняет усилителю никакого вреда. Диод $Д_1$ позволяет предохранить от пробоя переход база—

эмиттер выходного транзистора T_2 при случайном воздействии сигнала противоположной полярности, что необходимо при использовании диффузионных германиевых и кремниевых высокочастотных транзисторов, у которых его допустимое значение составляет всего 1,5—3 В.

Мы рассмотрели основные требования, которым должен отвечать оконечный усилитель, и наиболее часто встречающиеся цепи стабилизации его режима. Перейдем к рассмотрению конкретных

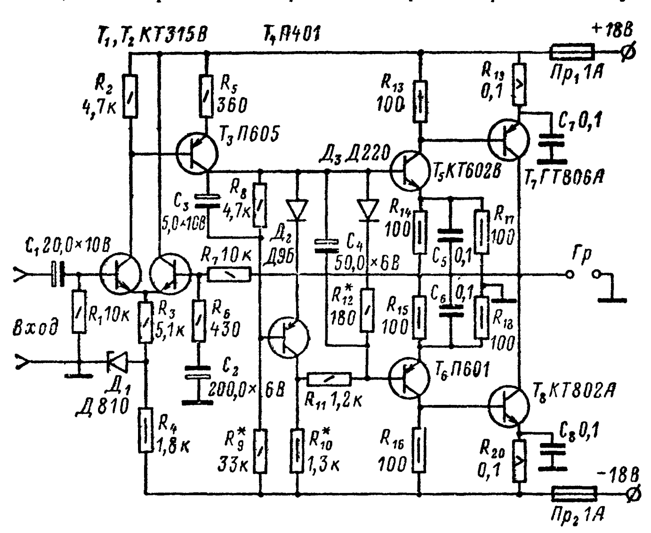


Рис. 9. Схема оконечного усилителя с $P_{ном}=12$ Вт.

схем оконечных усилителей. Приведенные расчеты помогут радиолюбителю оценить возможности различных схем, а также правильно выбрать элементы, если у него не окажется указанных в схемах.

Усилитель, схема которого дана на рис. 9, имеет следующие характеристики. Его выходная мощность составляет 12 Вт при $R_н=6$ Ом, частотная характеристика линейна от 10 Гц до 30 кГц при $P_{вых}=1$ Вт. Нелинейные искажения при номинальной выходной мощности на частоте 1000 Гц не превышают 0,6—0,8%. Максимальная выходная мощность 20—25 Вт. Входное сопротивление 10 кОм, чувствительность 350 мВ. Шумы на выходе оконечного усилителя при закороченном входе и питании от стабилизированного источника с заземленной точкой, схема которого дана на рис. 39, не превышают 0,16 мВ.

Входной сигнал через разделительный конденсатор подается на базу транзистора T_1, который вместе с транзистором T_2 образует дифференциальный каскад. После усиления в первом каскаде сигнал поступает на базу транзистора T_3, включенного по схеме с ОЭ. Связь между транзисторами T_1 и T_3, а также между всеми транзисторами, непосредственная, т. е. оконечный усилитель является усилителем постоянного тока. Для стабилизации режима работы этого каскада в цепи эмиттера транзистора T_3 установлен резистор

R_5, с помощью которого вводится отрицательная обратная связь по току. К коллектору транзистора T_3 подключены транзисторы фазоинверторного каскада, выполненного на транзисторах T_5 и T_6 разной проводимости. В качестве выходных используют транзисторы разной проводимости T_7 и T_8.

Характерной особенностью данного усилителя является использование в каждом плече двух транзисторов разной проводимости. Включение выходных транзисторов ГТ806А и КТ802А выполнено так, что коллекторы у них соединены вместе. Это позволяет закреплять их на одном радиаторе без изоляционных прокладок.

Также следует отметить, что в связи с применением транзисторов разной проводимости в каждом плече выходного каскада оказалось возможным осуществить включение фазоинвенторных транзисторов по схеме с ОЭ, а выходные транзисторы подключить к коллекторам этих транзисторов. Для ограничения максимального тока через выходные транзисторы в их эмиттерные цепи установлены соответственно резисторы R_{19} и R_{20}. Для лучшей симметрии выходного каскада в эмиттерные цепи транзисторов фазоинверторного каскада включено по два резистора, один из которых соединен с выходом усилителя (такое соединение имеет место в большинстве радиолюбительских схем), а другой с нулевым (заземленным) выводом блока питания.

Весь оконечный усилитель охвачен отрицательной обратной связью по напряжению с выхода усилителя на его вход. Сигнал обратной связи с выхода усилителя через резистор R_7 подается на базу транзистора T_2 дифференциального каскада. Глубина отрицательной обратной связи определяет и стабилизирует коэффициент усиления по напряжению всего оконечного усилителя и определяется сопротивлениями резисторов R_7 и R_6. Одновременно эта цепь позволяет осуществлять стабилизацию положения средней точки выходного каскада (см. рис. 6).

Для стабилизации тока покоя выходных транзисторов T_7, T_8 и их тепловой защиты используется электронная схема, собранная на транзисторе T_4 и диодах $Д_2$, $Д_3$, аналогичная приведенной на рис. 4. Для обеспечения стабильной работы входного дифференциального каскада (транзисторы T_1, T_2) при изменении напряжения они имеют общую эмиттерную нагрузку (R_3), напряжение на которой стабилизируется с помощью стабилитрона $Д_1$.

В качестве простейшей защиты от перегрузки в цепях питания установлены плавкие предохранители на 1 А. Для ограничения тока через нагрузку (например, в случае короткого замыкания) можно дополнительно поставить плавкий предохранитель на 2 А на выходе усилителя. Указанная схема не критична к значению питающего напряжения и остается работоспособной в диапазоне от ±15 до ±30 В. В этом случае соответственно изменяется выходная мощность. Следует проверить, не превышают ли режимы работы транзисторов предельно допустимые при росте E, и, если необходимо, установить эти транзисторы на радиаторах.

При налаживании усилителя изменением сопротивления резистора R_9 устанавливают между коллекторами транзисторов T_3, T_4 напряжение 2—3,5 В, измерением сопротивления резистора R_{10} — нулевой ток через нагрузку, а резистора R_{12} — начальный ток через транзисторы T_7, T_8, при котором пропадают искажения типа «ступеньки» (30—60 мА).

На рис. 10 (кривая *а*) показана характеристика шумов оконечного усилителя, выполненного по схеме (см. рис. 9). Контрольная метка (область Lin) соответствует сигналу —70 дБ относительно 1 В (0,0003 В), а в области *С* дана интегральная величина шумов усилителя. Измерение характеристик и запись проводилась на приборах Pegelschreiber PSG-101 и Terz-Oktav-Analysator TOA-11, выпускаемых в ГДР.

Высоким требованиям отвечает схема оконечного усилителя мощностью 20 Вт, показанная на рис. 11 [4]. Эта мощность развивается при $R_н = 4$ Ом и входном сигнале 1 В. Коэффициент нели-

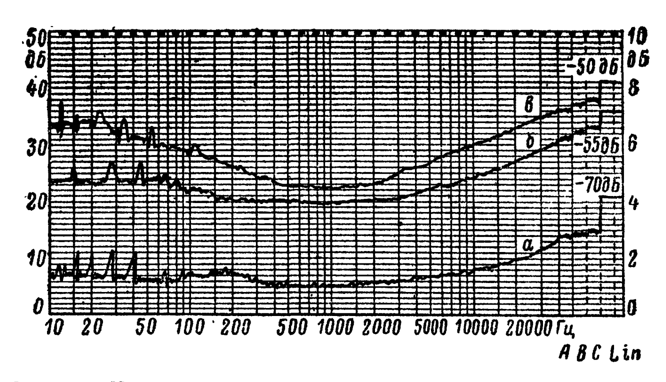


Рис. 10. Частотная характеристика шумов усилителя.

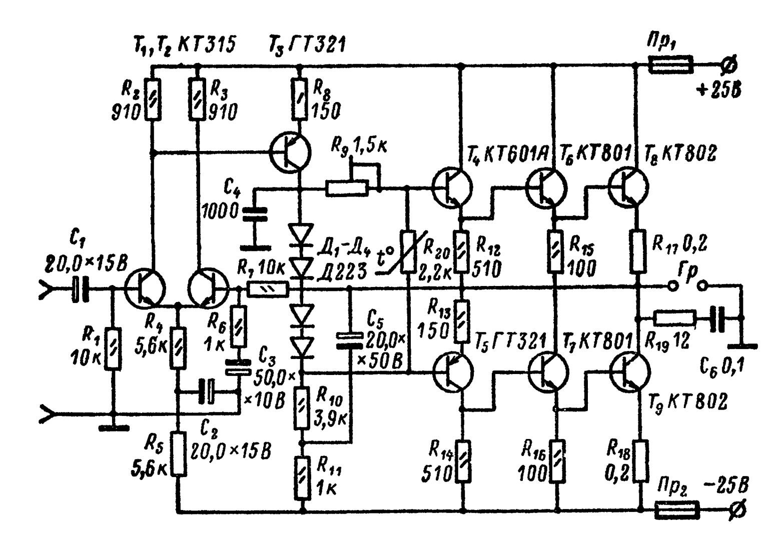


Рис. 11. Схема оконечного усилителя мощностью 20 Вт.

нейных искажений 0,7%, рабочий диапазон частот 20—20 000 Гц при неравномерности ±0,5 дБ. Относительный уровень помех — 86 дБ при питании от нестабилизированного источника с нулевой точкой, в котором установлены конденсаторы фильтра емкостью 4000,0× ×25 В.

В схемах оконечных усилителей рис. 9 и 11 связь между транзисторами непосредственная. Входные транзисторы усилителя образуют дифференциальные каскад. В коллекторную цепь второго усилительного каскада (T_3), включенного по схеме с ОЭ, установлен конденсатор C_4 для предотвращения возбуждения усилителя на высоких частотах. Этой же цели служит цепочка $R_{19}C_6$, которая подключается параллельно нагрузке.

В выходном каскаде используются одинаковые кремниевые транзисторы типа *n-p-n*. Оба плеча имеют по три транзистора, включенные по схеме составного эмиттерного повторителя. Для улучшения экономических показателей усилителя в его схему введена цепь вольтодобавки R_{11} — C_5. Для предотвращения теплового пробоя выходных транзисторов на их радиаторе закрепляется терморезистор R_{20}. Для ограничения тока через нагрузку в цепях питания установлены плавкие предохранители на 2 А, если усилитель работает на нагрузку $R_н = 4$ Ом.

С помощью переменного резистора R_9 сначала устанавливают ток покоя оконечных транзисторов в пределах 50—70 мА, а затем, несколько изменяя это значение, добиваются того, чтобы ток через нагрузку не превышал 15 мА. На этом установка режимов работы усилителя по постоянному току считается оконченной. После окончания установки режимов по постоянному току усилитель должен работать и никаких дополнительных регулировок не требует. Правда, для дифференциального каскада желательно подобрать транзисторы с коэффициентами передачи по току, отличающиеся не более чем на 15%. Эти транзисторы могут быть типов КТ315А, КТ315В, КТ315Г, КТ312Б с $B_{ст} \geqslant 50$. Транзисторы типа КТ801 можно заменить на транзисторы типа П701, П702. Выходные транзисторы могут быть типа КТ802, КТ803, КТ805.

К недостаткам этой схемы следует отнести то, что невозможна раздельная точная подстройка тока покоя и постоянного напряжения на выходе усилителя одним резистором R_9. Эта схема критична и к типу применяемых в ней транзисторов (особенно T_3, T_5).

Несомненный интерес представляет схема оконечного усилителя, разработанная М. С. Семиным (рис. 12). Отличительной особенностью этой схемы является то, что выходные каскады обоих плеч выполнены на одинаковых транзисторах. Первые два каскада усилителя выполнены по дифференциальной схеме на транзисторах T_1, T_2 и T_5, T_6. Так как транзисторы предоконечных каскадов T_7 и T_8 подключены к коллекторным нагрузкам разных плеч дифференциального каскада, то это позволяет отказаться от фазоинверторного каскада, который применяется в схеме (см. рис. 9, 11). Транзисторы T_3 и T_4 предназначены для стабилизации режимов работы каскадов усилителя. С помощью переменного резистора R_3 осуществляется балансировка схемы и добиваются нулевого тока через нагрузку, а резистором R_{13} регулируют начальный ток оконечных транзисторов. Конденсатор C_3 позволяет устранить нежелательные щелчки при включении усилителя. Пока конденсатор C_3 не заряжен, транзистор T_3 заперт и не поступает напряжение на эмиттеры транзисторов T_1 — T_2, образующих входной дифференциальный каскад. Следова-

тельно, сигнал, поступающий на базу транзистора, не может пройти. Когда же конденсатор C_3 зарядится, схема придет в рабочее состояние. Но емкость конденсатора выбрана большой, а поэтому его время заряда достаточно длительно и оконечный усилитель начинает работать несколько позже предварительного. Это и позволяет

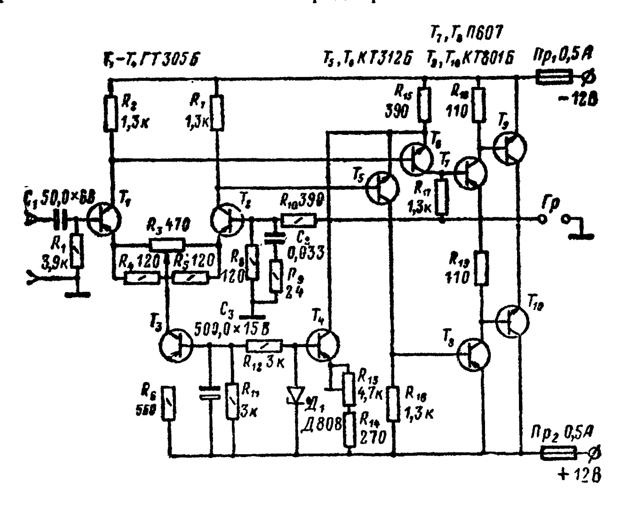


Рис. 12. Схема оконечного усилителя.

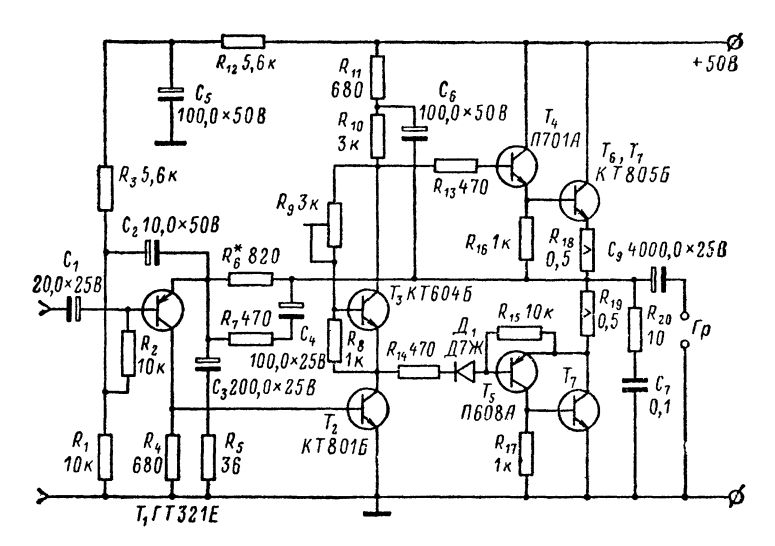


Рис. 13. Схема оконечного усилителя мощностью 35 Вт.

устранить характерные щелчки, слышимые в громкоговорителях при включении питания.

Радиолюбителей, предпочитающих схемы оконечных усилителей с разделительным конденсатором на выходе для подключения громкоговорителей, может заинтересовать оконечный усилитель «Elysee-30-Merkuri» (Франция) (рис. 13). Схема может быть выполнена на транзисторах широкого применения, выпускаемых отечественной промышленностью. Его выходная мощность $P_{ном}=35$ Вт при $R_н=$ $=4$ Ом, рабочий диапазон частот 20—30 000 Гц, нелинейные искажения 0,5%. Для питания этого усилителя предназначен стабилизированный источник с одним заземленным полюсом (см. рис. 38).

Входной каскад усилителя выполнен на транзисторе T_1, включенном по схеме ОЭ. Для увеличения входного сопротивления усилителя в этом каскаде введена положительная обратная связь с эмиттера транзистора на вход с помощью конденсатора C_2 и резистора R_2. С коллектором транзистора T_1 соединена база транзистора T_2 второго усилительного каскада, после которого сигнал уже поступает на фазоинверторный каскад, собранный на транзисторах T_4, T_5. Для предотвращения пробоя перехода эмиттер — база транзистора T_5 в цепь базы включен диод, который пропускает сигналы только одной полярности. Для задания напряжения смещения между базами предоконечных транзисторов, определяющего ток покоя оконечных транзисторов, используется схема с регулирующим транзистором T_3 (см. рис. 5). Так как база выходного транзистора T_7 соединена с коллектором предоконечного транзистора T_5, а у T_6 база с эмиттером T_4, то для обеспечения лучшей симметрии работы выходного каскада эмиттер транзистора T_5 соединен с коллектором транзистора T_7, а между его базой и эмиттером включен резистор R_{15}. Кроме того, резистор R_{19}, ограничивающий ток через выходной транзистор T_7, установлен в его коллекторной цепи, а не в эмиттерной, как у T_6.

Стабилизация положения средней точки усилителя осуществляется введением отрицательной обратной связи по постоянному току. Для этого эмиттер транзистора T_1 через резистор R_6 соединен со средней точкой выходного каскада.

Для стабилизации работы всего усилителя введена еще отрицательная обратная связь по напряжению с выхода усилителя через цепочку C_4 — R_7 в эмиттер входного транзистора T_1. Величина этой связи определяется параметрами элементов цепочек R_7 — C_4 и R_5 — C_3.

При настройке этого усилителя подбором сопротивления резистора R_6 добиваются симметрии выходного сигнала, что достигается в том случае, когда напряжение в средней точке равняется половине напряжения питания (см. рис. 3, *а*). Подстроечным резистором R_9 устанавливается ток покоя мощных выходных транзисторов, при котором пропадают искажения типа «ступеньки» (50—70 мА). Так же как и в схеме усилителя на рис. 11, в этой схеме используется цепь вольтодобавки, а для предотвращения его возбуждения на ультразвуковых частотах параллельно нагрузке подключена цепочка $R_{20}C_7$. Во время настройки режимов этого усилителя по постоянному току к его входу необходимо подключить эквивалент генератора (резистор сопротивлением 10—20 кОм), а не закорачивать, как для усилителей, схемы которых приведены на рис. 9, 11, 12.

Так как в современных высококачественных усилителях низкой частоты применяют высокочастотные транзисторы, то особое зна-

чение приобретают меры предотвращения его от возбуждения на высоких и ультразвуковых частотах. Наиболее часто для этого в коллекторную цепь транзистора T_3 (см. рис. 11) включают конденсатор емкостью 1000—1500 пФ. Большая емкость конденсатора нежелательна, так как возможен завал частотной характеристики в области высоких частот. С этой же целью параллельно резистору R_7 (см. рис. 9) можно подключить конденсатор емкостью 20—200 пФ.

Коэффициент усиления оконечного усилителя определяется отношением сопротивлений резисторов R_7/R_6: чем это отношение больше, тем меньше отрицательная обратная связь по напряжению и больше его коэффициент усиления. А так как с ростом частоты уменьшается сопротивление параллельной цепочки R_7 — конденсатор, то это приводит к снижению коэффициента усиления всего усилителя на высоких частотах и предупреждает его возбуждение.

Изменяются также схемы входной цепи и подключения нагрузки (рис. 14). Как в первом, так и во втором случае образуется делитель напряжения, который приводит к закорачиванию высоких частот через конденсатор C_1' (рис. 14,*а*) и C_1 (рис. 14,*б*). Эффективным средством, устраняющим ультразвуковую генерацию, является включение конденсатора емкостью 1000—1500 пФ между базой и коллектором выходного транзистора (T_7 или T_8 на рис. 9).

Индикатор выхода. В некоторых случаях балансировку каналов стереоусилителя проводят с помощью индикатора выхода со стрелочным прибором (рис. 15). Сигнал с выхода усилителя поступает на переменный резистор R_1, затем на выпрямитель, после этого на стрелочный измерительный прибор. В качестве измерительного прибора используется миллиамперметр типа 4203 с полным отклонением стрелки при токе 30 мА. С помощью переменного резистора R_1

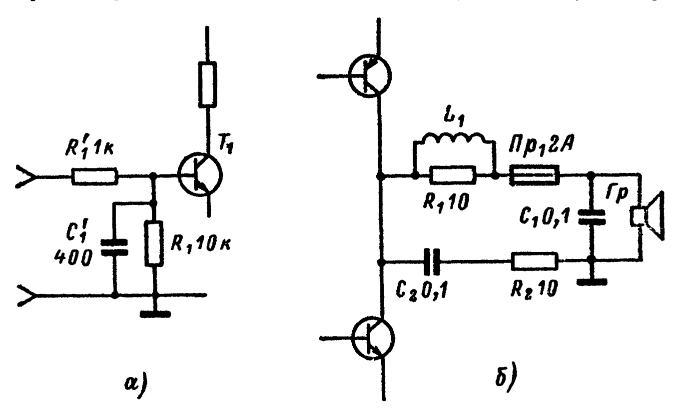


Рис. 14. Схемные решения для предотвращения возбуждения оконечного усилителя.

устанавливается необходимая чувствительность устройства. Например, при выходном сигнале в 10 В стрелка занимает положение, соответствующее делению 80. Обычно в стереофонических усилителях устанавливают такой индикатор выхода в каждом канале. Однако

можно иметь только один индикатор, если на его входе установить переключатель, с помощью которого выбирается канал для измерения.

При введении электродинамической обратной связи (ЭДОС) удается улучшить переходные характеристики, воспроизведение низших звуковых частот, расширив область эффективного излучения серийных громкоговорителей до 30—40 Гц в замкнутом объеме 25—30 дм^3, и снизить нелинейные искажения на этих частотах. Обычно датчик электродинамической обратной связи устанавливается на диффузоре громкоговорителя. В промышленных конструкциях использовались два типа датчиков. Первый в виде отдельной катушки, прикрепленной к диффузору, которая двигается вместе с ним в магнитном поле. Второй в виде пьезокерамического виброприемника, также связанного с диффузором громкоговорителя. В любительских устройствах для получения напряжения ЭДОС используют противо-э. д. с. звуковой катушки громкоговорителя, которую отделяют от основного сигнала с помощью мостовой схемы. Этот способ обладает рядом существенных недостатков, однако из-за своей простоты применяется достаточно широко.

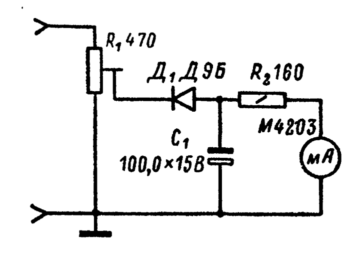


Рис. 15. Схема индикатора выхода.

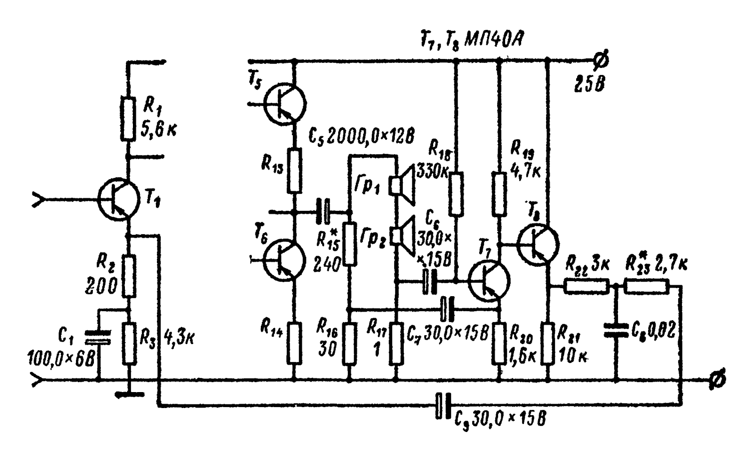


Рис. 16. Схема включения электродинамической обратной связи.

Для широкого повторения удобнее мостовая схема, не имеющая индуктивностей и выполненная полностью на резисторах (рис. 16) [1]. В диагональ моста, образованного резисторами R_{15}, R_{16}, R_{17} и громкоговорителями, включен усилитель ЭДОС на транзисторах T_7,

T_8, причем второй каскад на транзисторе T_8 является эмиттерным повторителем. Балансировка моста проводится только по постоянному току и подбором сопротивления резистора R_{15} добиваются тока в диагонали моста равным нулю. От сопротивления резистора R_{23} зависит величина ЭДОС; изменением сопротивления ее устанавливают наибольшей на частоте 1000 Гц. Подбором емкости конденсатора C_8 добиваются возможно равной частотной характеристики в области высоких частот. Для компенсации «завала» частотной характеристики в области низких частот за счет введения ЭДОС в предварительном усилителе следует предусмотреть соответственно ее подъем приблизительно до 6 дБ на частоте 40 Гц.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

В нашей стране в настоящее время наибольшее распространение среди радиолюбителей получили стереофонические проигрыватели с пьезоэлектрическими головками звукоснимателей. Поэтому рассмот-

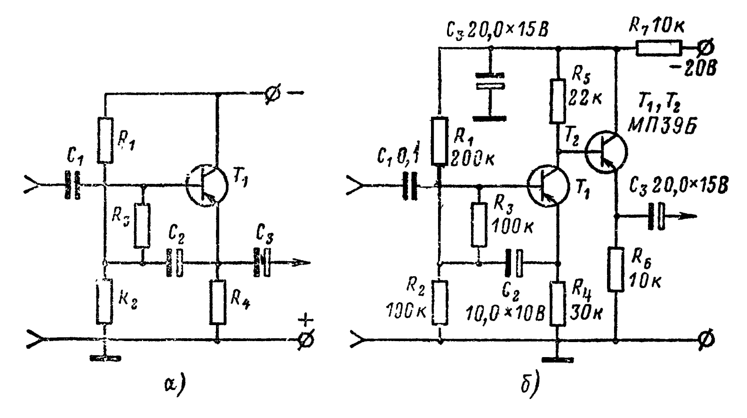


Рис. 17. Схемы эмиттерных повторителей с повышенным входным сопротивлением.

рим предварительные усилители, предназначенные для совместной работы с такими головками. Входной каскад усилителя в этом случае выполняется с большим входным сопротивлением (не менее 470 кОм). Этой цели удовлетворяют эмиттерные повторители на составных транзисторах и каскады с положительной обратной связью, позволяющие значительно увеличить входные сопротивления по переменному току (рис. 17, *а*, *б*). Входное сопротивление переменному току такого каскада можно определить из выражения

$$R_{вх} \approx R_3 [1 + (R_н / r_э)], \qquad (12)$$

где $R_н$ — сопротивление нагрузки каскада переменному току; $r_э$ — сопротивление эмиттерного перехода транзистора; R_3 — сопротивление в цепи базы транзистора.

Хорошими параметрами обладает входной каскад, выполненный на транзисторах разной проводимости (рис. 18, *а*) [6]. Использова-

ние в схеме непосредственной связи между транзисторами разной проводимости позволило ввести последовательно-отрицательную обратную связь по току, благодаря чему эти каскады отличаются высокой температурной стабильностью, высоким входным и низким выходным сопротивлениями. Характеристики этих каскадов улучшаются при использовании транзисторов с большими значениями $B_{ст}$. Входное сопротивление такого эмиттерного повторителя составляет 2 МОм, а частотная характеристика линейна в диапазоне от 10 до 100 000 Гц.

С целью уменьшения наводок и потерь в соединительных кабелях указанные эмиттерные повторители рационально размещать в непосредственной близости от звукоснимателя, поместив его в экране (как это выполнено в проигрывателе «Концерт-М»).

Так как величина выходного сигнала с пьезоэлектрического звукоснимателя достаточно велика, то регулятор уровня можно установить на входе предварительного усилителя (см. рис. 1). В высококачественных усилителях обычно применяют тонкомпенсированные регуляторы громкости (рис. 19).

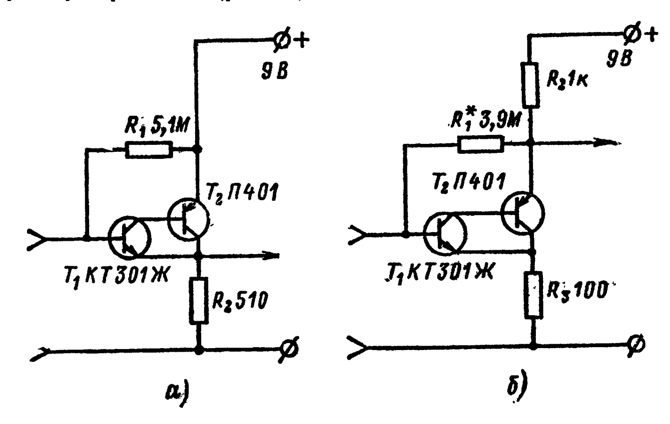


Рис. 18. Каскады с непосредственной связью между транзисторами разной проводимости.

Применение таких регуляторов громкости объясняется тем, что человеческое ухо имеет различную чувствительность к сигналам в зависимости от их частоты и громкости. Эти зависимости известны под названием «кривых равной громкости». При малых уровнях громкости для обеспечения равной громкости необходимо ввести подъем низших и высоких частот. Имеющиеся регуляторы тембра в большинстве предварительных усилителей не могут обеспечить такие диапазоны регулировки. Однако с увеличением громкости требуемый подъем граничных частот уменьшается. Следовательно, тонкомпенсированные регуляторы громкости должны обеспечивать такую частотную характеристику входного устройства, при которой входной сигнал ослабляется в зависимости от его частоты, а именно, наибольшее ослабление имеют сигналы частотой примерно 3000 Гц,

а меньшее — низкочастотные и высокочастотные. Степень их ослабления должна зависеть и от положения регулирующего органа.

Для обеспечения плавности регулировки уровня громкости все переменные резисторы, применяющиеся в рассматриваемых схемах, должны быть типа В. На рис. 19, *а, б* приведены простейшие схемы тонкомпенсированных регуляторов громкости, выполненные на спаренных переменных резисторах. Первые две схемы предназначены

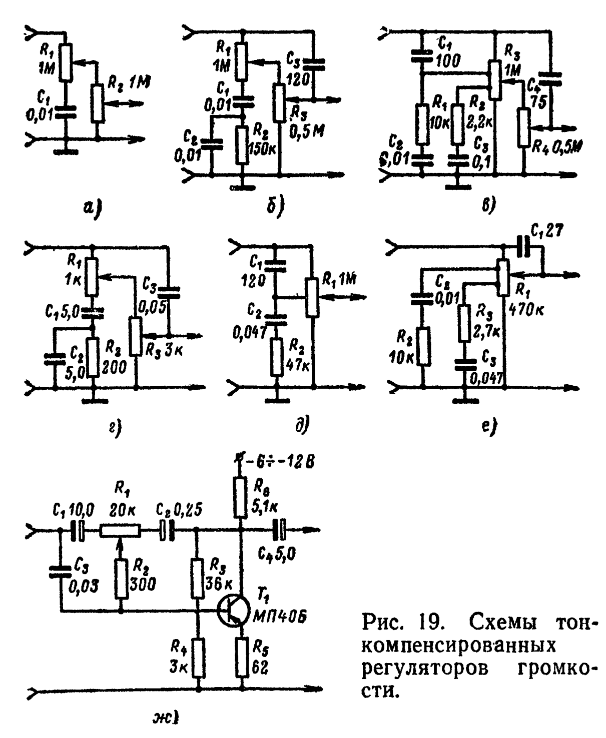


Рис. 19. Схемы тонкомпенсированных регуляторов громкости.

для использования с электронными устройствами, имеющими большое входное сопротивление (более 1 МОм), а схема 19, *г* — для транзисторных усилителей с малым входным сопротивлением. На рис. 19, *д, е* приведены широко распространенные схемы, выполненные на переменных резисторах с отводами. На рис. 19, *в* показана более сложная схема, в которой используются уже два переменных резистора, один из которых имеет два отвода. На рис. 19, *ж* приведена схема тонкомпенсированного регулятора громкости, предложенная В. И. Долгих и В. В. Долгих, с использованием частотно-зависимой обратной связи, регулирующей работу транзистора. В этой конструкции можно применять переменные резисторы типа А. Так как входное сопротивление такого транзисторного устройства меняется с частотой, то его можно подключать только к каскадам с низким выходным сопротивлением, например эмиттерным повторителям. Как видно из приведенных схем, для выполнения таких регуляторов

(в каждом канале) необходимо иметь спаренные переменные резисторы типа В или же переменные резисторы типа В с отводами. При создании же стереофонического усилителя будет необходим уже счетверенный блок переменных резисторов, которые в настоящее время наша промышленность не выпускает. Достаточно трудно радиолюбителю также достать спаренный блок переменных резисторов типа В с отводами.

Очевидно, что в любительской практике для регулировки уровня можно использовать просто переменные резисторы типа А (см. рис. 2). При создании квадрафонической системы, если нет счетверенного блока переменных резисторов (или для стереофонического усилителя — спаренного), используется галетный переключатель на 11 положений (например, типа 11П4Н), причем число плат (галет) зависит от количества каналов. При общем сопротивлении входного регулятора уровня 1 МОм рекомендуется для такого переключателя следующий ряд сопротивления (в кОм): 2,4; 5,1; 12; 24; 47; 62; 91; 150; 240; 360, причем резистор с меньшим сопротивлением соединяется с общим (заземленным) проводом.

Места подключения цепочек для получения компенсированного регулятора громкости по схеме рис. 19, *е* можно определить, используя следующие приближенные зависимости. Сопротивление участков переменного резистора R_1 между выводами соединенными соответственно с общим проводом и R_3, а также между R_3 и C_2 можно принять равными 0,1 R_1. Сопротивления резисторов R_2 и R_3 находятся из равенств $R_2 \approx 0{,}011\,R_1$, а $R_3 \approx 0{,}0125\,R_1$. Емкости конденсаторов корректирующих цепочек равны соответственно $C_2 = 4\ (0{,}1\ R_1)$, а $C_3 = 3{,}9\ (0{,}1\ R_1)$. В последних равенствах сопротивления в килоомах, а емкости конденсатора в микрофарадах.

Суммарный требуемый коэффициент усиления по напряжению предварительного усилителя легко определить из равенства

$$K_u = U_{\text{вх.о.у}}/U_{\text{и.с}}, \qquad (13)$$

в котором $U_{\text{и.с}}$ — напряжение, развиваемое источником сигнала; $U_{\text{вх.о.у}}$ — чувствительность оконечного усилителя. Если используется регулятор тембра, то дополнительно должен обеспечиваться запас усиления, компенсирующий ослабление сигнала в темброблоке.

Так как в высококачественных усилителях пределы регулирования тембра обычно не менее ±14 дБ, то сигнал частотой 1000 Гц ослабляется в нем приблизительно в 10 раз, а это значит, что его коэффициент передачи 0,1. Например, если $U_{\text{вх.о.у}} = 0{,}5$ В, а $U_{\text{и.с}} = 50$ мВ, то необходимый коэффициент усиления предварительного усилителя из выражения (13) равен 10. При установке в нем регуляторов тембра общий коэффициент усиления всех его каскадов уже должен быть равен 100 (это значение для сигнала частотой 1000 Гц).

В большинстве любительских и ряде промышленных конструкций предварительных усилителей сразу за входным каскадом находится регулятор тембра. При такой компоновке усилителя оказывается, что входной сигнал значительно ослабляется и на последующий усилительный каскад приходится весь общий коэффициент усиления. Для рассматриваемого примера окажется, что после темброблока с коэффициентом передачи 0,1 сигнал уменьшится соответственно до 5 мВ, следовательно, последующие каскады, усиливающие этот сигнал до 0,5 В, должны иметь коэффициент усиления 100.

Кроме того (так как сигнал достаточно мал), требуется обеспечивать малые собственные тепловые шумы транзисторов и малые пульсации питающего напряжения.

Если же после входного поместить усилительный каскад с коэффициентом усиления равным или большим обратной величины коэффициента передачи регулятора тембра, то это позволит более равномерно распределить общий коэффициент усиления по каскадам предварительного усилителя. Если, например, $U_{и.с}=50$ мВ, то на блок регулировки тембра подается уже усиленный в 10 раз сигнал, равный 0,5 В, а на его выходе сигнал снова будет равным 50 мВ. Следовательно, последующий усилительный каскад должен иметь коэффициент усиления только 10, чтобы выходной сигнал был равен 0,5 В. Таким образом, в каждом каскаде предварительного усилителя при таком его построении сигнал имеет уровень не меньше входного. Это позволяет не предъявлять жестких требований к собственным тепловым шумам транзисторов, так как они будут малы по сравнению с уровнем усиливаемого сигнала, и к пульсации напряжения питания каскадов усилителя. Кроме того, можно применять простейшие схемы усилительных каскадов, так как в среднем каждый из них должен будет иметь коэффициент усиления около 10.

В приведенном примере специально выбран малый уровень входного сигнала, чтобы ясно показать, что в первом случае теряется преимущество пьезоэлектрического звукоснимателя, заключающееся в его большом уровне выходного сигнала.

Схема усилителя будет проще, если использовать усилительный каскад, схема которого показана на рис. 18, *б*. У такого каскада большое входное сопротивление (220 кОм) и малое выходное (примерно 1 кОм). Коэффициент усиления его определяется отношением сопротивления резисторов R_2/R_3 и равен 10, частотная характеристика линейна в диапазоне от 10 до 100 000 Гц. Если на вход каскада подключить резистор сопротивлением 300 кОм, что входное сопротивление такого каскада уже будет более 500 кОм, что необходимо для нормальной работы пьезоэлектрического звукоснимателя. Для компенсации уменьшения входного сопротивления такого усилительного каскада с ростом частоты параллельно дополнительному резистору подключают конденсатор емкостью 75 пФ.

Малое выходное сопротивление этого усилителя делает удобным включение на его выходе регулятора тембра, так как для обеспечения расчетной глубины регулировки тембра необходимо, чтобы внутреннее сопротивление источника сигнала было меньше входного сопротивления регулятора тембра.

В радиолюбительской практике наиболее широкое распространение получили *RC* регуляторы тембра мостового типа (рис. 20, *а*). При указанных на рисунке значениях элементов эта схема обеспечивает пределы регулирования по низким частотам с помощью переменного резистора R_2 в пределах ±18 дБ и по высоким с помощью резистора $R_5 \pm 18$ дБ. На выходе регулятора тембра удобно установить аналогичный усилительный каскад (см. рис. 18, *б*). Его входное сопротивление значительно больше выходного сопротивления регулятора тембра и обеспечивает расчетную глубину регулировки тембра.

Кроме того, часто применяется схема *RC* регулятора тембра с частотно-зависимой обратной связью (рис. 21). Пределы его регулирования ±16 дБ на частотах 20 и 20 000 Гц относительно частоты

1000 Гц. Входное сопротивление переменному току последующего за регулятором тембра каскада должно быть не менее 400 кОм, для чего и используется эмиттерный повторитель.

Возможно также несколько иное включение RC регулятора тембра мостового типа (см. рис. 20, *б*). Пределы его регулирования ± 14 дБ на частотах 50 и 12 000 Гц.

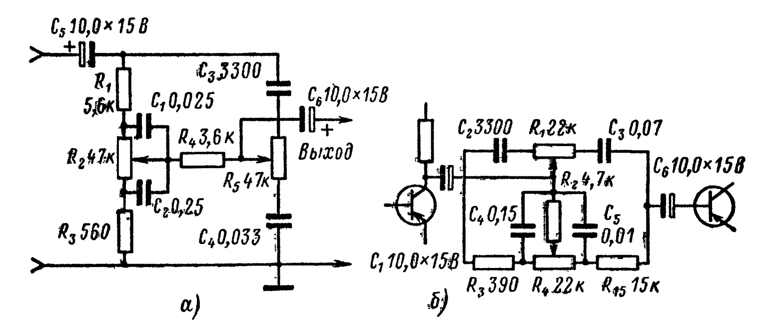


Рис. 20. Мостовая схема RC регулятора тембра.

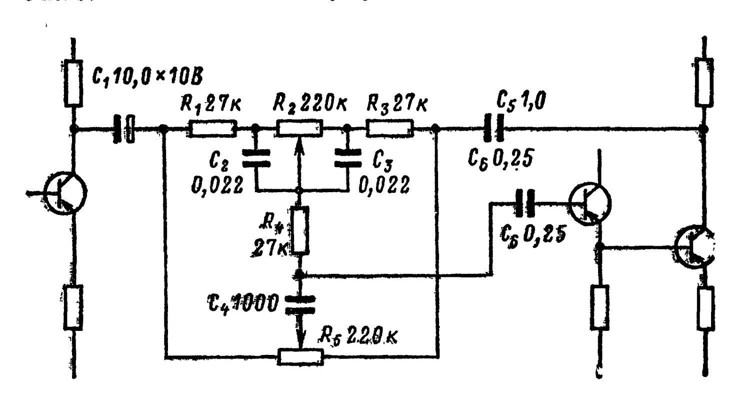


Рис. 21. Схема регулятора тембра с частотно-зависимой обратной связью.

На рис. 22 представлена полная схема усилителя напряжения с тембpоблоком. В ней используются одинаковые усилительные каскады (см. рис. 18, *б*). Коэффициент усиления усилителя равен 10, входное сопротивление 220 кОм, частотный диапазон 10—100 000 Гц, пределы регулировки тембра ± 18 дБ. При создании стереофонического усилителя регулировка тембра осуществляется с помощью спаренных переменных резисторов по 47 кОм.

Если у радиолюбителя нет спаренных переменных резисторов, указанных на схеме, а есть другие, то перерасчет значений элементов регулятора тембра можно провести, используя следующие зависимости. Примем сопротивление переменных резисторов R_2 и R_5

(см. рис. 20, *а*) равными между собой, причем они обеспечивают пределы регулировки тембра примерно ±12 дБ на частотах 100 Гц и 10 кГц. Сопротивления резисторов R_2, R_1, R_3, R_4 следует выбирать в таком соотношении 1 : 0, 1 : 0, 0,1 : 0,1, а емкости конденсаторов C_3, C_4, C_1, C_2 в соотношении 1 : 15 : 22 : 220. Емкость конденсатора C_3 (в пикофарадах) вычисляется из выражения $C_3=10^8/R_2$, в котором сопротивление резистора $R_2(R_5)$ выражено в омах.

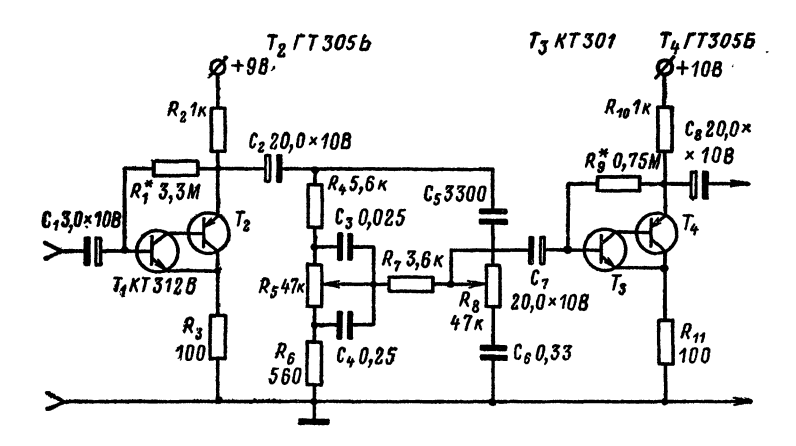


Рис. 22. Схема предварительного усилителя с темброблоком.

В рассматриваемой схеме предварительного усилителя в темброблоке (см. рис. 22) можно использовать переменные резисторы с сопротивлением до 100 кОм. Более точный расчет элементов регулятора тембра можно провести по методике, указанной в [14]. Следует учесть также, что для обеспечения требуемой плавности регулировки тембра переменные резисторы должны быть типа В.

Счетверенный регулятор тембра для квадрафонического усилителя можно изготовить на базе галетного переключателя, например типа 11П4Н. Рекомендуется следующий ряд значений резисторов для регулятора низкой частоты: 1,8; 2,0; 2,7; 3,6; 4,3; 6,2; 6,8; 7,5; 6,8; 6,2 и для регулятора высокой частоты: 1,6; 1,6; 1,8; 2,4; 4,3; 4,7; 7,5; 10; 7,5; 5,1 (в килоомах). Резисторы с меньшим сопротивлением должны соединяться соответственно с резистором R_6 и конденсатором C_6 (см. рис. 22). Рассмотренный предусилитель можно использовать для совместной работы с любым из оконечных усилителей, схемы которых приведены выше.

Частотная характеристика шумов всего усилителя (см. рис. 9 и 22) показана на рис. 10, причем кривая *б* на рис. 10 получена при положении регуляторов тембра, соответствующих линейной характеристике всего тракта, а кривая *в* на рис. 10 — широкой полосе, т. е. при максимальном подъеме низких и высоких частот. Как видно из графиков для линейной характеристики, шумы на выходе развивают напряжение 1,3 мВ (область *С*) и 2,0 мВ при широкой полосе.

Для получения минимальных искажений всего усилителя большую роль играет выбор напряжения питания каскадов предварительного усилителя. Так как в основном применяются схемы включения транзисторов с ОЭ; величина неискаженного сигнала

$$U_{\text{неиск}} \approx 0{,}25 U_{\text{пит}}, \qquad (14)$$

где $U_{\text{пит}}$ — напряжение питания усилительного каскада. Величину максимального выходного сигнала предварительного усилителя следует выбирать в 3—4 раза больше номинальной чувствительности оконечного усилителя. Например, если чувствительность оконечного

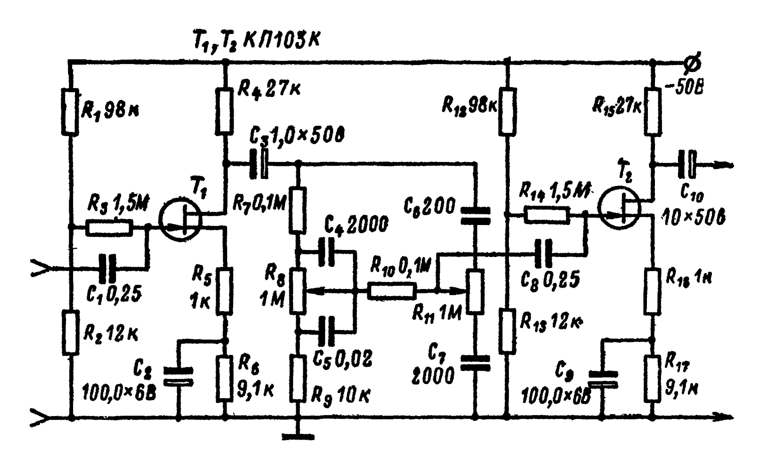


Рис. 23. Схема предварительного усилителя на полевых транзисторах.

усилителя составляет 0,5 В, то предварительный усилитель должен обеспечивать максимальный неискаженный выходной сигнал не менее 2 В. Используя выражение (14), определяем напряжение питания: $U_{\text{пит}} \geqslant 8$ В. С целью уменьшения искажений и расширения динамического диапазона усилителя, а также имея в виду, что требуется установка дополнительных усилительных каскадов (микрофонный усилитель и др.), значение $U_{\text{пит}}$ следует выбирать не менее 8—9 В.

Схема предварительного усилителя упроститься, если радиолюбитель сможет использовать усилительные каскады на полевых транзисторах (схемы разработаны И. И. Плаксиным, Ю. С, Красовым, А. С. Лехковой, рис. 23). Первый каскад на транзисторе T_1 обеспечивает высокое входное сопротивление предварительного усилителя, равное 1,5 МОм, которое достаточно для подключения пьезоэлектрического звукоснимателя. Так как входное сопротивление второго каскада, собранного тоже на полевом транзисторе, велико, то это позволяет в регуляторе тембра применять переменные резисторы сопротивлением 1 МОм. Каждый каскад этого усилителя обеспечивает усиление по напряжению около 10. Регулятор уровня можно установить на выходе предварительного усилителя.

Таблица 3

$R_г$, кОм	$I_{э.опт}$, мкА, при f_0, Гц				
	30	120	500	1000	10 000
0,05	200	300	500	500	500
0,2	150	200	200	200	400
0,5	100	100	150	150	200
1	50	50	100	100	200
2	20	20	50	50	100
5	20	20	50	50	50
10	10	10	20	20	20

При проектировании предварительных усилителей, предназначенных для совместной работы с электромагнитными и магнитофонными головками, особые трудности связаны с приблемой уменьшения собственных тепловых шумов входных транзисторов. В настоящее время в таких устройствах применяют малошумящие транзисторы типа П28 и кремниевые планарно-эпитаксиальные транзисторы. Для анализа и выбора наиболее оптимального режима их работы можно воспользоваться данными табл. 3 [13], в которой приведены установленные опытным путем значения оптимального тока эмиттера в зависимости от частоты сигнала f_0 и сопротивления источника сигнала $R_г$.

Следует иметь в виду, что оптимальное значение тока эмиттера не критично и при его изменении в 1,5 раза шумы изменяются незначительно.

С целью уменьшения шумов рекомендуется при малых и средних значениях $R_г$ устанавливать ток $I_э$ не более 100 мкА, а при больших $R_г$ выбирать еще меньшие значения тока (до 10 мкА).

Для транзистора П28 и малошумящих кремниевых планарных транзисторов коэффициент шума на низких частотах не зависит от напряжения между коллектором и эмиттером, поэтому в зависимости от конкретных условий и требований можно устанавливать любое напряжение от 1 до 8—10 В.

Следует отметить, что значение $I_э$ менее 100 мкА можно устанавливать только у кремниевых транзисторов, у которых значения $I_{к0}$ малы.

Таким образом, для высокоомных источников сигнала наиболее перспективны малошумящие кремниевые планарные транзисторы, режимы смещения которых обеспечивают пониженное потребление мощности. Так как расчет собственных шумов транзисторного усилителя достаточно сложен, то в радиолюбительских расчетах можно принять, что собственные тепловые шумы кремниевых планарных транзисторов, приведенные ко входу, составляют около 5—7 мкВ. Основываясь на этом предположении, при разработке предварительного усилителя воспроизведения для магнитофона в любительских условиях лучше использовать высокоомную головку даже в случае, когда на входе усилителя требуется включать эмиттерный повторитель. Выходной сигнал с высокоомной магнитной головки составляет около 3 мВ, а с низкоомной примерно 0,3 мВ. Естественно, что при применении низкоомной головки коэффициент усиления должен быть примерно в 10 раз больше, чем у высокоомной.

Разработанная в соответствии с указанными соображениями схема предварительного усилителя воспроизведения для подключения высокоомной магнитофонной головки показана на рис. 24. Входной каскад его выполнен по схеме эмиттерного повторителя (см. рис. 18, *а*). Далее идет двухкаскадный усилитель с непосредственной связью на кремниевых транзисторах T_3, T_4. Он охвачен отрицательными обратными связями как по току, так и по напряжению. Отрицательная обратная связь позволяет стабилизировать его режимы как при изменении температуры, так и при замене транзисторов.

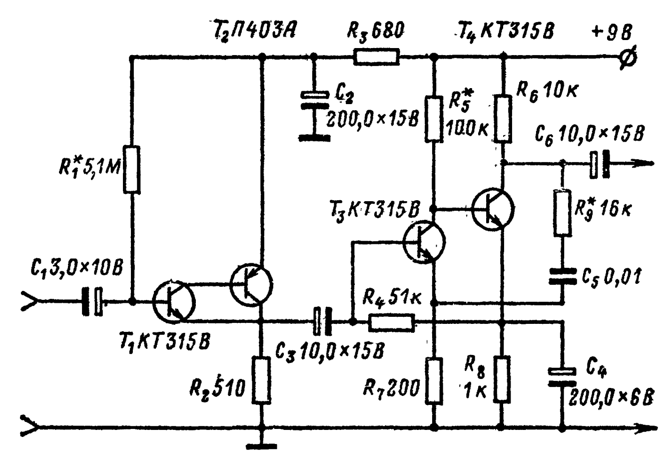


Рис. 24. Предварительный усилитель воспроизведения для магнитофона.

Посредством резистора R_4, включенного между базой транзистора T_3 и эмиттером транзистора T_4, осуществляется обратная связь по постоянному току. Цепочка R_9 — C_5 образует отрицательную обратную связь по напряжению с выхода усилителя на эмиттер первого транзистора этого каскада T_3. Такая цепочка обеспечивает подъем частотной характеристики на низших частотах до 6 дБ на октаву. Коэффициент усиления по напряжению каскада в приближенных расчетах можно определить из выражения

$$K_и \approx (R_{о.с} + R_7)/R_7, \qquad (15)$$

где $R_{о.с}$ — эквивалентное сопротивление обратной связи на выбранной частоте, R_7 — сопротивление в цепи эмиттера первого каскада (T_3). Если от емкости конденсатора C_5 зависит степень подъема частотной характеристики, то сопротивление резистора R_9 определяет глубину отрицательной обратной связи по напряжению и выбирается в зависимости от скорости магнитофонной ленты. С ростом скорости его сопротивление увеличивается, так как уровень выходного сигнала, развиваемый магнитной головкой, также увеличивается. Подбором сопротивления резистора R_5 добиваются симметричного ограничения выходного сигнала.

Реальный коэффициент усиления такого каскада будет несколько меньше рассчитанного (на 20—30%). При указанных значениях элементов на схеме усилитель имеет входное сопротивление около 2 МОм и обеспечивает подъем частотной характеристики на 18 дБ на частоте 50 Гц относительно частоты 1000 Гц, при работе с магнитной головкой от магнитофона «Айдас-9» на скорости 9,53 см/с развивает напряжение до 250—280 мВ. Максимальное неискаженное выходное напряжение около 1 В.

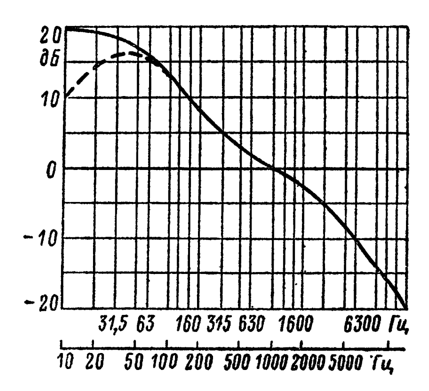


Рис. 25. Частотная характеристика предварительного усилителя для электромагнитного звукоснимателя.

При разработке предварительного усилителя к электромагнитной головке звукоснимателя используется схема, аналогичная предыдущей. Но так как входное сопротивление этого предусилителя выбирается равным 47 кОм (оптимальное сопротивление нагрузки большинства современных электромагнитных звукоснимателей), то эмиттерный повторитель на входе не нужен. Кроме того, предъявляются требования и к частотной характеристике предусилителя. Она должна обеспечивать подъем в области низких частот и завал на высоких, т. е. должна соответствовать характеристике, приведенной на рис. 25 (ГОСТ 7893-72). С целью подавления низкочастотных шумов и вибраций допускается некоторый завал характеристики на частотах ниже 50 Гц (пунктирная кривая). Такой выбор частотной характеристики предусилителя объясняется тем, что выходной сигнал с электромагнитного звукоснимателя пропорционален скорости колебания иглы и, следовательно, растет с увеличением частоты воспроизводимого сигнала.

На рис. 26 показана схема дополнительного предварительного усилителя к электромагнитному звукоснимателю. Так как этот усилитель предназначен для совместной работы с усилителем чувствительностью 35 мВ и входным сопротивлением 220 кОм (см. рис. 22), а выходной сигнал с электромагнитного звукоснимателя равен 3 мВ, то необходимый коэффициент усиления, равный 12, обеспечивается двумя каскадами на транзисторах T_1, T_2 без конденсатора C_7, шунтирующего резистор в цепи эмиттера транзистора T_2. Изменением

сопротивления резистора R_3 осуществляется установка рабочих режимов транзисторов. Конденсатор C_3 предназначен для предотвращения возбуждения усилителя на ультразвуковых частотах. Для увеличения коэффициента усиления усилителя достаточно установить шунтирующий конденсатор C_7 (показан пунктиром).

Выходное сопротивление этого усилителя значительно уменьшится, если применить дополнительный каскад на транзисторе T_3, выполненный по схеме эмиттерного повторителя (на рис. 26 показан

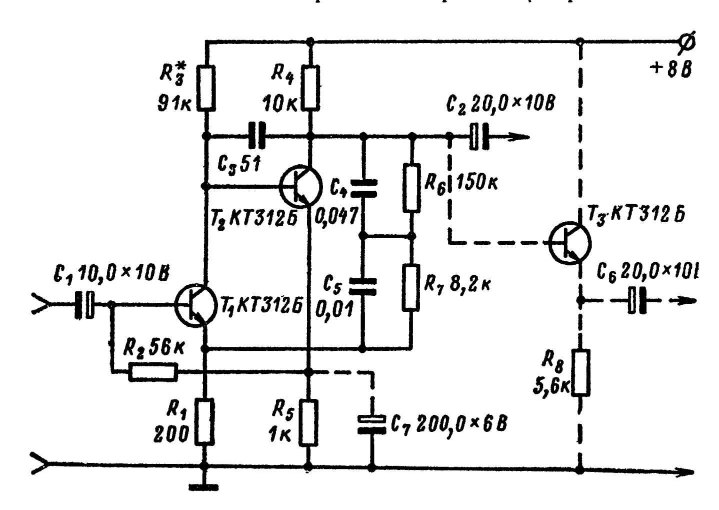


Рис. 26. Схема дополнительного предварительного усилителя для электромагнитного звукоснимателя.

пунктиром). Для снижения шумов всего усилителя необходимо подобрать транзистор T_1.

В современных любительских усилителях используется ряд дополнительных устройств. Рассмотрим принцип работы и схемы некоторых из них.

В настоящее время все большую популярность завоевывает квадрафоническая система звуковоспроизведения. В любительских условиях возможно создание систем полной квадрафонии (дискретной) и псевдоквадрафонических. В первом случае запись передачи и воспроизведение звука осуществляется по четырем независимым каналам. Для этого, например, можно использовать четырехдорожечный магнитофон и четырехканальный оконечный усилитель. При создании псевдоквадрафонической системы достаточно иметь стереофоническую систему, к которой в простейшем случае подключают дополнительные громкоговорители (рис. 27, 28) [11]. Если имеется четырехканальный усилитель, то для создания квадрафонического эффекта можно использовать дифференциальный усилитель (рис. 29). С помощью этого усилителя выделяется сигнал, равный разности поступающих. Принцип действия этого устройства основывается на том, что если вычесть сигнал одного стереоканала из другого, то часть звуковой информации, подходящей к микрофонам непосред-

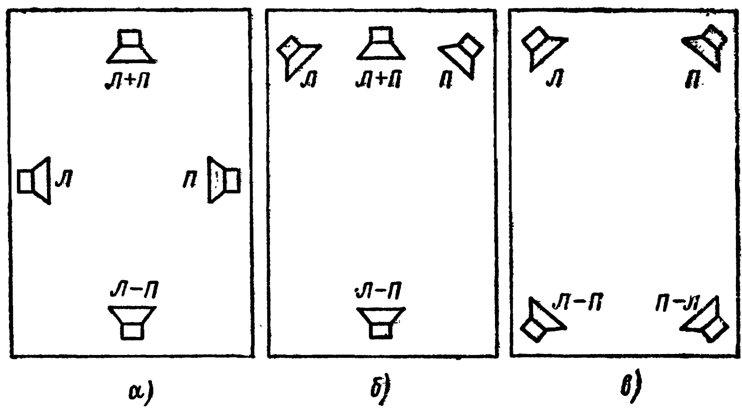


Рис. 27. Схемы расположения громкоговорителя при квадрафоническом воспроизведении звука.

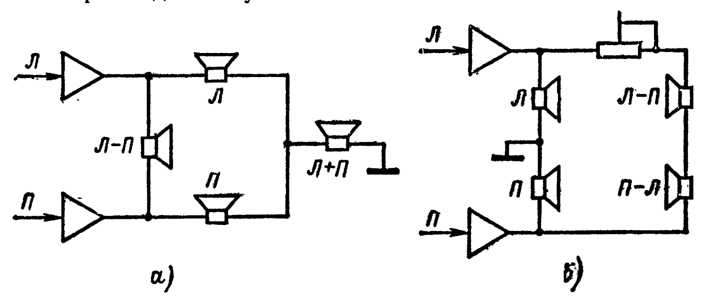


Рис. 28. Схемы подключения громкоговорителей к стереофоническому усилителю.

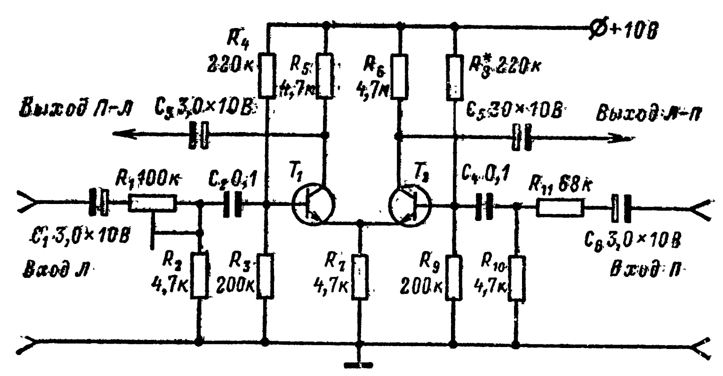


Рис. 29. Схема дифференциального каскада. Транзисторы T_1 и T_2 типа КТ312Б.

ственно от источника сигнала, ликвидируется, и останется только пространственная информация, вызванная отражениями звука от стен студии звукозаписи. Это создает «эффект зала» и улучшает качество воспроизведения по сравнению со стереофоническим.

Сигналы от стереофонических каналов *Л* и *П* поступают на базы транзисторов T_1 и T_2, которые работают на общую эмиттерную нагрузку R_7. Сигнал канала *Л* через резистор R_7 поступает на базу транзистора T_2 в противофазе с сигналом канала *П*. Следовательно, на резисторе R_6, установленном в коллекторной цепи транзистора T_2, выделяется сигнал разности *Л* — *П*. Аналогично на нагрузочном резисторе R_5 в коллекторной цепи транзистора T_1 выделяется сигнал разности *П* — *Л*. Если сигналы *Л* и *П* равны, то выходные сигналы будут равны нулю, а если, например, *Л* = 0, то на выходе транзисторов будут сигналы *П* и —*П*.

При подключении этой системы следует иметь в виду, что сигнал *Л*—*П* должен поступать в акустическую систему с левой стороны, а *П* — *Л* — с правой. Данное устройство включают после предварительного усилителя (см. рис. 48), а к выходам его подключают два дополнительных оконечных усилителя. Так как входное сопротивление этого усилителя 50 кОм, то его включение не вызывает существенного ослабления сигналов в основных каналах.

При настройке усилителя подбором сопротивления резистора R_8 устанавливают одинаковые напряжения на коллекторах транзисторов T_1 и T_2, а изменением сопротивления резистора R_1 добиваются равной чувствительности каналов. Следует отметить, что максимальные входные (и выходные) напряжения составляют около 0,1 В.

Появление кассетных, а особенно кассетных стереофонических магнитофонов вызвало необходимость совершенствования различных методов борьбы с собственными тепловыми шумами транзисторов усилителя. Наиболее совершенной в настоящее время является система «Dolby», которая позволяет уменьшать шумы (особенно на высоких частотах) до 10 дБ. Ее использование позволило довести у кассетных стереофонических магнитофонов отношение сигнал/шум до 50 дБ и более, т. е. до такого же уровня, что и у катушечных магнитофонов. Однако эта система достаточно сложна и в любительских условиях ее повторить трудно. Можно рекомендовать две другие системы уменьшения уровня шумов в паузах (во время воспроизведения звука шумы полностью заглушаются сигналом). Первая система использует принцип ограничения сигнала по амплитуде (пороговые ограничители шума), т. е. при малых сигналах усилитель заперт, а при больших работает в нормальном режиме. Во второй системе, получившей название «DNL» (Dynamic Noise Limiter — динамический ограничитель шумов), используется следующее явление: при сужении полосы пропускания усилителя уровень его шумов падает [12]. Использование этого явления возможно, так как в слабых сигналах преобладают низкочастотные составляющие. С этой целью в усилитель вводится устройство, регулирующее полосу пропускания в зависимости от уровня поступающего сигнала.

На рис. 30 представлена принципиальная схема порогового ограничителя шумов в паузах [18]. Включается это устройство между предварительным и оконечным усилителями. Входной сигнал поступает на эмиттерный повторитель, собранный на транзисторе T_4, и затем через резистор R_{13} на выход усилителя. Одновременно через резистор R_{14} сигнал подводится ко входу трехкаскадного усилителя, собранного на транзисторах T_1 — T_3. После усиления сигнал пода-

ется на выпрямитель, собранный на диодах $Д_1 — Д_4$, где он выпрямляется и создает отрицательное напряжение на диодах $Д_6 — Д_9$. При малом уровне входного сигнала и при наступлении паузы под действием положительного напряжения питания диоды $Д_6 — Д_9$ открываются и шунтируют выход транзистора T_4, а следовательно, и вход оконечного усилителя, ослабляя тем самым выходной сигнал. При возрастании входного сигнала после его усиления и выпрямления отрицательное напряжение на диодах $Д_1 — Д_4$ закрывает диоды $Д_6 — Д_9$ и прекращается шунтирование входа оконечного усили-

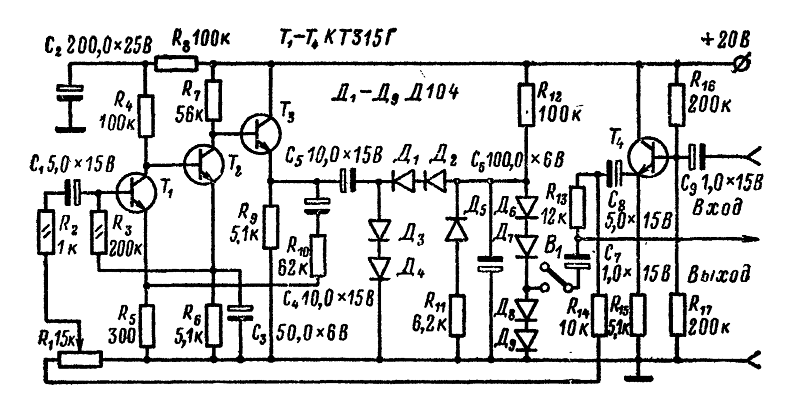


Рис. 30. Схема порогового ограничителя шумов в паузах.

теля; коэффициент передачи усилителя возрастает. Для нормальной работы усилителя входной сигнал должен составлять 0,1—1 В. Уровень срабатывания устройства регулируется переменным резистором R_1 и зависит от уровня входного сигнала и характера воспроизводимой программы. Положение резистора R_1 должно быть таким, чтобы не нарушалась правильная передача сигналов с низким уровнем, но одновременно подавлялись шумы в паузах. Отключение устройства, снижающего шумы усилителя, осуществляется с помощью переключателя B_1. При использовании этого устройства с предварительным усилителем, схема которого показана на рис. 22, и любым оконечным переключатель B_1 лучше установить на входе и просто закорачивать зажимы *Вход* и *Выход*.

Для регулирования уровня сигнала в ограниченной области звукового диапазона применяют многоканальные регуляторы тембра. В высококачественных усилителях НЧ применяют как различное число каналов, так и разные частоты регулировки. Рассмотрим такой регулятор тембра, позволяющий осуществлять регулировку в пределах ±22 дБ на четырех частотах: 80, 800, 4500 и 11 000 Гц (рис. 31) [17]. Так как на входе устройства установлен истоковый повторитель, собранный на кремниевом планарном транзисторе T_1, то это позволяет подключать ко входу любые высокоомные источники сигнала. Уровень поступающего входного сигнала ограничивается с помощью тонкомпенсированного регулятора громкости R_3. Затем сигнал поступает на дифференциальный усилитель, выполненный на

транзисторах $T_2 - T_3$. Далее из коллекторной цепи транзистора T_3 сигнал подается на базу транзистора T_4, включенного по схеме резистивного усилителя с общим эмиттером и нагрузкой R_{18} в коллекторной цепи. Кроме того, база транзистора T_3 через резистор R_{13} соединена с коллектором транзистора T_4. Благодаря таким глубоким отрицательным обратным связям как по переменному, так и по постоянному току обеспечивается высокая термостабильность всего усилителя, допускающая работу его в диапазоне температур от 5 до 75° С.

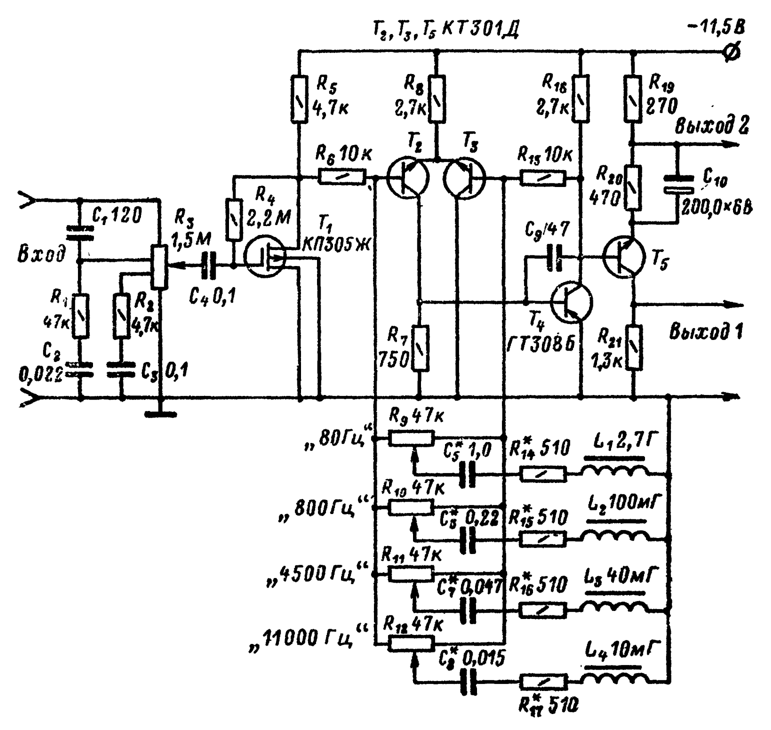


Рис. 31. Четырехканальный регулятор тембра.

Включенные в базовые цепи транзисторов резисторы R_6 и R_{13} образуют вместе с колебательными контурами $L_1C_5 - L_4C_8$ частотно-избирательные делители напряжения, причем каждый из них настроен на определенную частоту: L_1C_5 на частоту 80 Гц, L_2C_6 — 800 Гц, L_3C_7 — 4500 Гц и L_4C_8 — 11 000 Гц.

От сопротивлений резисторов R_{14}—R_{17}, включенных последовательно в колебательные контуры, зависит глубина регулировки и крутизна скатов резонансных кривых. На рис. 32 приведены частотные характеристики усилителя при крайних положениях движков регуляторов тембра $R_9 - R_{12}$ (кривая для каждого регулятора снималась при отключенных остальных регуляторах).

Последний каскад устройства выполнен на транзисторе T_5 и позволяет получать на *Выходе 1* сигнал амплитудой до 1 В при сопротивлении нагрузки 1,5 кОм, а на *Выходе 2* до — 0,15 В при сопротивлении нагрузки 200 Ом.

Благодаря глубоким обратным связям усилитель не требует регулировки, кроме настройки резонансных контуров на выбранные

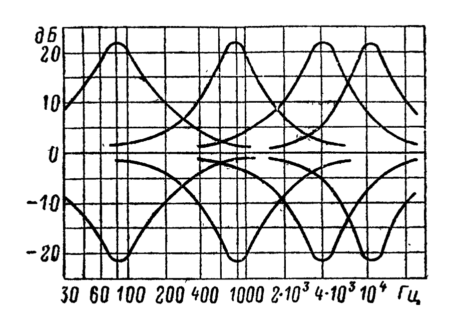


Рис. 32. Частотные характеристики четырехканального регулятора тембра.

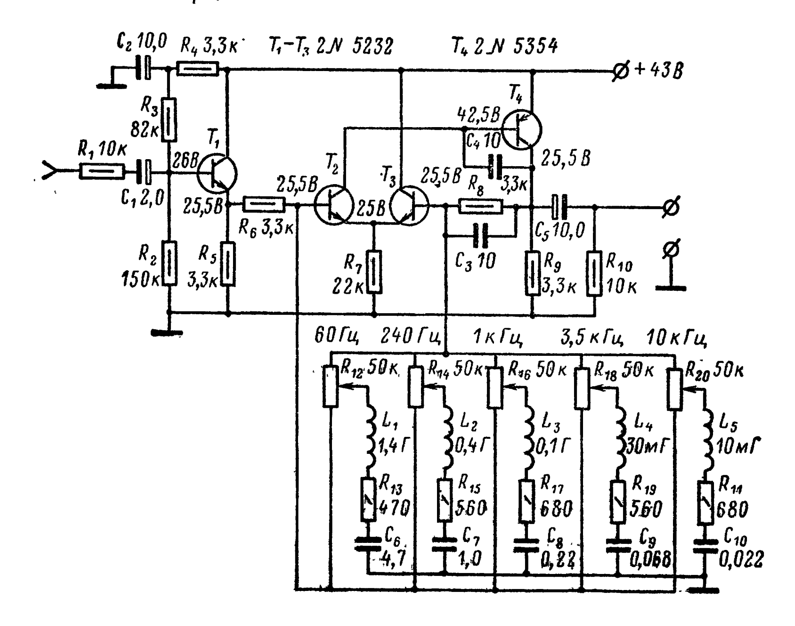


Рис. 33. Схема пятиканального регулятора тембра.

частоты подбором конденсаторов $C_5 - C_8$. Если такой регулятор тембра рассчитан для работы с шестью каналами, то в этом случае рекомендуется выбрать следующий ряд частот: 60, 250, 1500, 12 000 и 20 000 Гц. Для оперативности работы с многоканальными регуляторами тембра лучше всего использовать линейные потенциометры типа СП3-23. Градуировка шкалы таких потенциометров производится непосредственно в децибелах.

На рис. 33 показана схема пятиканального регулятора тембра [19], допускающего регулировку в пределах ± 12 дБ на частотах: 60, 250, 1000, 3500 и 10 000 Гц. Включают его между предварительным и оконечным усилителями или между линейным выходом магнитофона и оконечным усилителем. Так как для питания регулятора используется высокое напряжение, то можно не опасаться ограничения входного сигнала, а на входе не устанавливать регулятор уровня громкости.

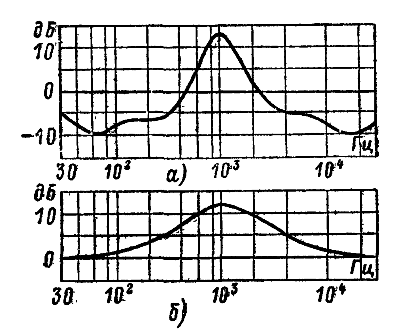


Рис. 34 Частотные характеристики пятиканального регулятора тембра.

Первый каскад на транзисторе T_1 выполнен по схеме эмиттерного повторителя. Подключение частотнозависимых регулирующих элементов между базами транзисторов T_2, T_3, составляющих дифференциальный каскад, аналогично показанному на рис. 31. Отличие состоит в несколько ином включении выходного транзистора T_4.

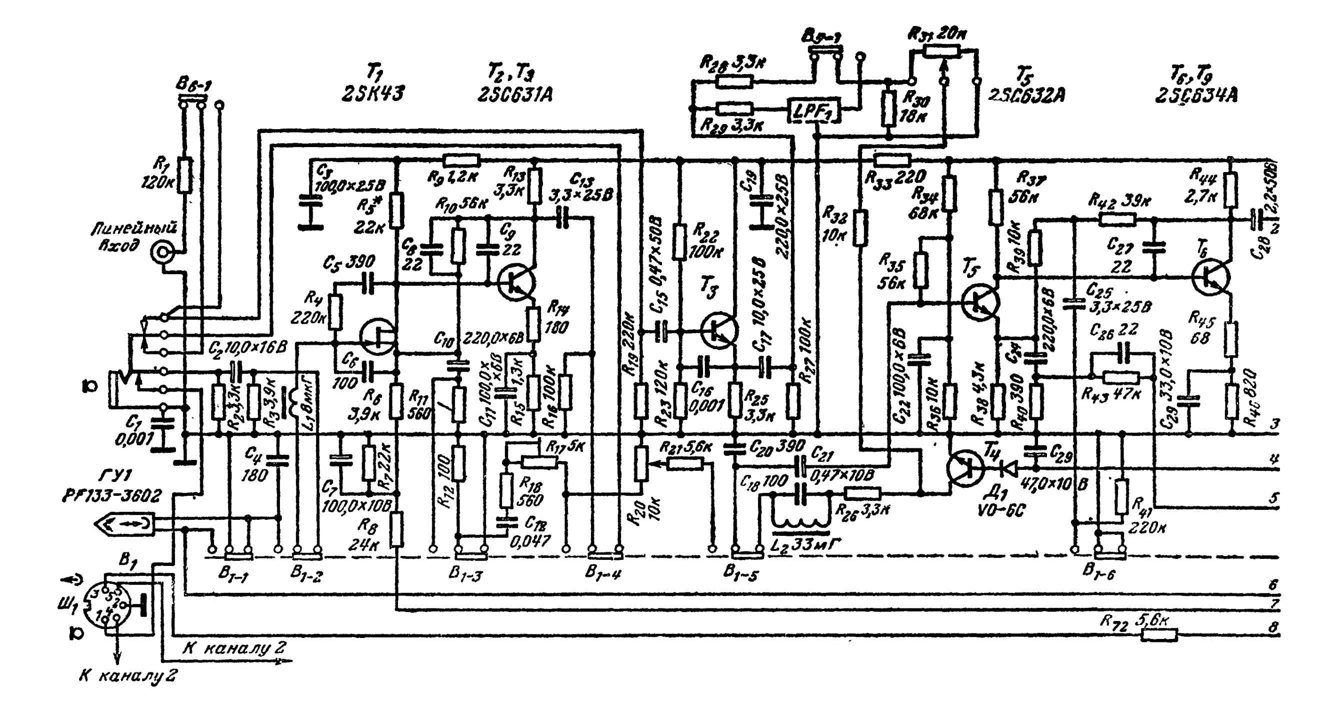
Действие устройства не отличается от разобранного выше. Для получения указанных параметров регулировки катушки индуктивности $L_1 - L_5$ должны иметь следующие сопротивления постоянному току: L_1 — 175 Ом, L_2 — 60 Ом, L_3 — 20 Ом, L_4 — 140 Ом, L_5 — 30 Ом.

Рассмотренный многоканальный регулятор тембра имеет входное сопротивление 75 кОм, а сопротивление нагрузки должно быть не менее 10 кОм.

Для иллюстрации работы многоканального регулятора тембра на рис. 34 показана его частотная характеристика, когда на частоте 1000 Гц осуществляется подъем на +12 дБ и все регуляторы установлены в положение —12 дБ (рис. 34, *а*) и в нулевом положении (рис. 34, *б*).

Для радиолюбителей представит несомненный интерес схема предварительного усилителя стереофонической кассетной приставки фирмы «Sony» типа TC-2250 SD. Отношение сигнал/шум усилителя 49 дБ. При применении системы «Dolby» обеспечивается шумопонижение 5 дБ на частоте 1 кГц и 10 дБ на частоте 5 кГц. Собственные шумы усилителя —72 дБ при входном сигнале 0,2 мВ (микрофонный вход), искажения 0,1%.

Для простоты на рис. 35 показана схема только одного канала. Входной каскад универсального усилителя выполнен на двух транзисторах $T_1 - T_2$ с непосредственной связью.



В6-1
Т1
2SK43
Т2, Т3
2SC631А
В5-1
R28 3,3к
R29 3,3к
LPF1
R31 20к
R30 18к
Т5
2SC632А
Т6, Т9
2SC634А
R1
120к
Линейный
вход
C3
100,0×25В
R9 1,2к
R13
3,3к
C13
3,3×25В
R5*
22к
R10 56к
C8
22
C9
22
C5 390
R4
220к
C6
100
C10 220,0×6В
R14
180
C2 10,0×16В
R2 3,3к
R3 3,9к
L1 8мкГ
R6
3,9к
R11
560
C11 100,0×6В
R15 1,3к
R16 100к
C1
0,001
C4
180
C7
100,0×10В
R7 2,2к
R12 100
R17 5к
R18
560
C12
0,047
R8
24к
ГУ1
PF133-3602
В1
Ш1
К каналу 2
В1-1
В1-2
В1-3
В1-4
В1-5
В1-6
R19 220к
C15 0,47×50В
R22
100к
Т3
C19
220,0×25В
C17 10,0×25В
R27 100к
R23 120к
C16
0,001
R25
3,3к
R21 5,6к
R20
10к
C20 390
C18 100
C21
0,47×10В
R26 3,3к
L2 33мГ
R32
10к
R33 220
R34
68к
R35
56к
C22 100,0×6В
R36 10к
Т4
Д1
VD-6С
R37
56к
R39 10к
C24 220,0×6В
R38 4,3к
R40 390
C29
47,0×10В
R42 39к
C27
22
C25
3,3×25В
C26 22
R43 47к
C29 33,0×10В
R41
220к
R44
2,7к
C28 2,2×50В
Т6
R45
68
R46 820
R72 5,6к
2
3
4
5
6
7
8

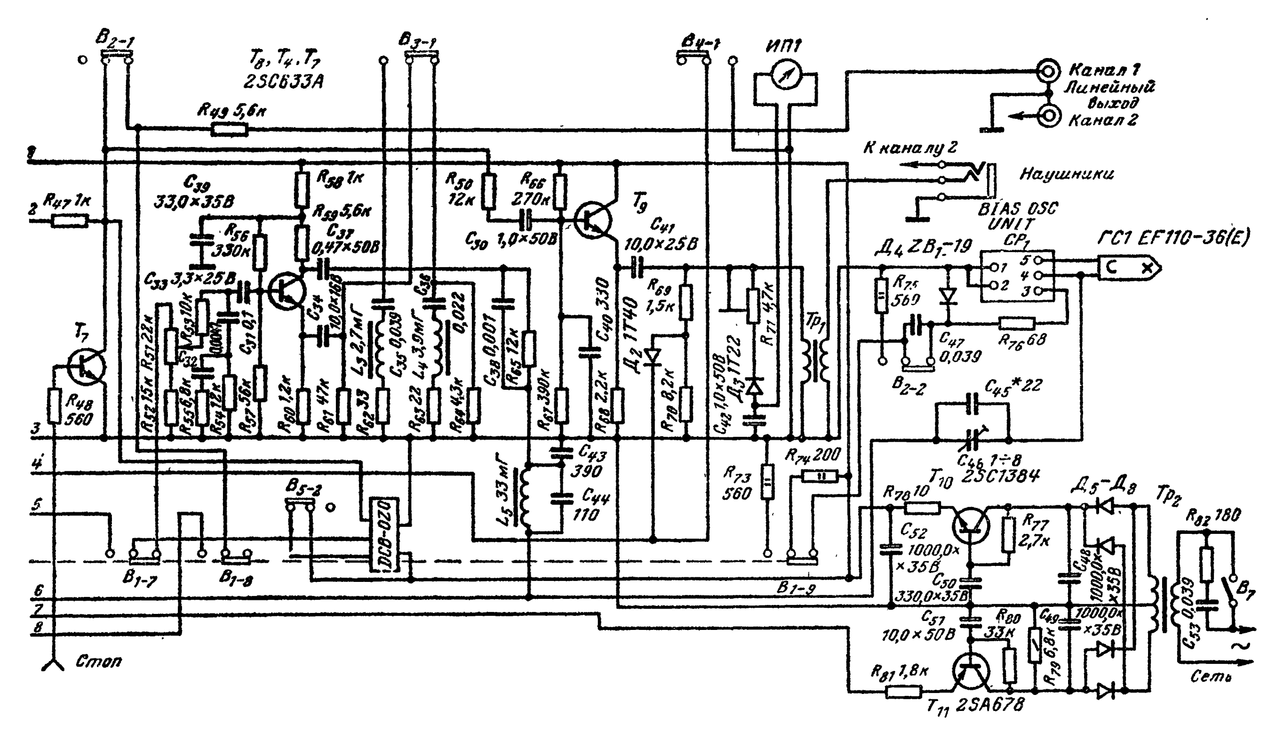


Рис. 35. Схема одного канала предварительного усилителя стереофонического кассетного магнитофона типа ТС-2250SD фирмы «Sony».

Для получения малых шумов при работе от микрофона входным является полевой транзистор T_1 с затвором типа *n*. Отрицательная обратная связь из соединенных последовательно конденсатора C_{12} и резисторов R_{17}, R_{18} обеспечивает необходимую частотную характеристику усилителя (подъем низких частот при воспроизведении). Сигнал с линейного выхода магнитофона (и ему эквивалентные) подается непосредственно на вход транзистора T_3, включенного по схеме эмиттерного повторителя. Такое построение усилителя позволяет значительно улучшить режим работы первого каскада (так как в этом случае он работает на высокоомную нагрузку) и увеличить отношение сигнал/шум при записи программ, имеющих значительный уровень сигнала. Уровень громкости устанавливается с помощью переменного резистора R_{31}, подключенного к выходу транзистора T_3. Одновременно там же подключается первый каскад противошумовой системы «Dolby». Третий каскад универсального усилителя также выполнен на двух транзисторах T_5, T_6 с непосредственной связью. Первый и третий каскады охвачены глубокими отрицательными обратными связями как по постоянному, так и по переменному току, способствующими стабилизации режима работы усилителя.

С коллектора транзистора T_6 сигнал поступает на линейный выход, если включен режим воспроизведения (для удобства линейный выход имеет два подключения штекер и пятиштырьковый разъем). Одновременно сюда поступает сигнал с выхода системы «Dolby».

Во время записи выходной сигнал с транзистора T_6 поступает на усилительный каскад, собранный на транзисторе T_8 и обеспечивающий необходимую частотную характеристику сигнала, поступающего на универсальную магнитную головку. Для этого к коллектору транзистора T_8 подключены соответствующие резонансные контуры.

На транзисторе T_9 выполнен эмиттерный повторитель, к выходу которого подключаются трансформатор для наушников, индикатор выхода, а также система автоматической регулировки усиления, собранная на транзисторе T_4.

С целью уменьшения переходных помех в усилителях (в результате чего улучшается эффект направленности сигнала) в стереофонический усилитель можно ввести компенсатор переходных помех. Принцип работы компенсатора основывается на том, что в усилительный тракт одного канала вводится противофазный по отношению к протекающей помехе сигнал. На рис. 36 приведена принципиальная электрическая схема компенсатора переходных помех, предложенная радиолюбителям журналом «Radio Ferschen Elektronik» (ГДР). Включать его можно между предварительным и оконечным усилителями, а если он вводится в усилитель к электромагнитному звукоснимателю, то его помещают между дополнительным предварительным усилителем с частотной коррекцией и основным предварительным усилителем (см. рис. 1). Он содержит два идентичных канала, входные устройства которых на транзисторах $1\text{-}T_1$ и $2\text{-}T_1$ выполнены по схеме эмиттерных повторителей. Такое схемное построение позволяет не опасаться нарушения работы того каскада, к которому это устройство подключается. Установленные на входе переменные резисторы $1\text{-}R_1$ и $2\text{-}R_2$ позволяют регулировать уровень поступающего сигнала. Вторые каскады этого устройства — фазоинверторные — собраны из транзисторах $1\text{-}T_2$ и $2\text{-}T_2$.

Сигнал из коллекторной цепи через конденсатор $1\text{-}C_3$ ($2\text{-}C_3$) подается на базу транзистора $1\text{-}T_3$ ($2\text{-}T_3$), включенного по схеме эмит-

торного повторителя. В результате этого уменьшается выходное сопротивление всего устройства и облегчается его согласование с последующими каскадами, к которым он подключается.

Одновременно на вход третьего каскада 1-T_3 (2-T_3) через резистор 2-R_{10} (1-R_{10}) и конденсатор 1-C_4 (2-C_4) поступает сигнал, снимаемый с переменного резистора 2-R_9 (1-R_9), включенного в эмиттерную цепь транзистора 2-T_3 (1-T_3) соседнего канала. Известно,

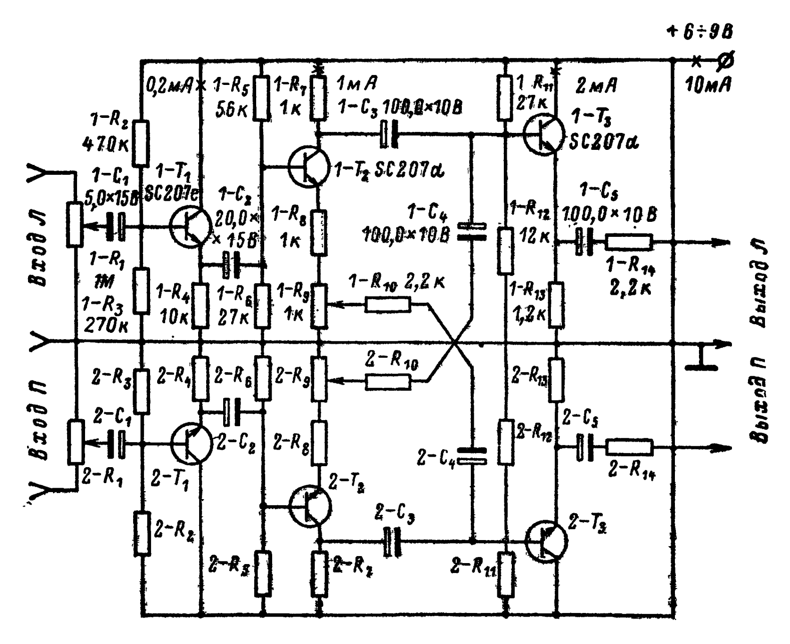


Рис. 36. Схема компенсатора переходных помех.

что сигналы, снимаемые с коллекторной и эмиттерной нагрузок, повернуты относительно друг друга на 180°. Следовательно, к третьему каскаду подходят два сигнала, причем сигнал из соседнего канала повернут на 180° относительно первого. При сложении этих сигналов и происходит взаимное уничтожение проникающих переходных помех.

При настройке компенсатора сначала устанавливают режимы работы каскадов подбором сопротивлений резисторов $R_2(T_1)$, $R_5(T_2)$ и $R_{11}(T_3)$. Затем при проигрывании грампластинок устанавливают с помощью переменных резисторов 1-R_1(2-R_1) максимальное неискаженное напряжение на выходах компенсатора. Затем при проигрывании испытательной пластинки (33С-01641 ГОСТ 5289-68) изменением сопротивлений подстроечных резисторов 1-R_9(2-R_9) добиваются минимального прохождения сигнала соседнего канала. При использовании измерительных приборов (вольтметр переменного тока или осциллограф) можно добиться подавления переходной помехи

до 50 дБ. Сигнал, поступающий на вход компенсатора, не должен превышать 1,5 В.

Данный компенсатор вносит затухание около 4,5 дБ. При повторении схемы компенсатора переходных помех можно использовать транзисторы типа КТ315Б, КТ315Г.

Одним из средств, повышающих качество звуковоспроизведения, является экспандирование, т. е. искусственное расширение динамического диапазона воспроизводимой программы.

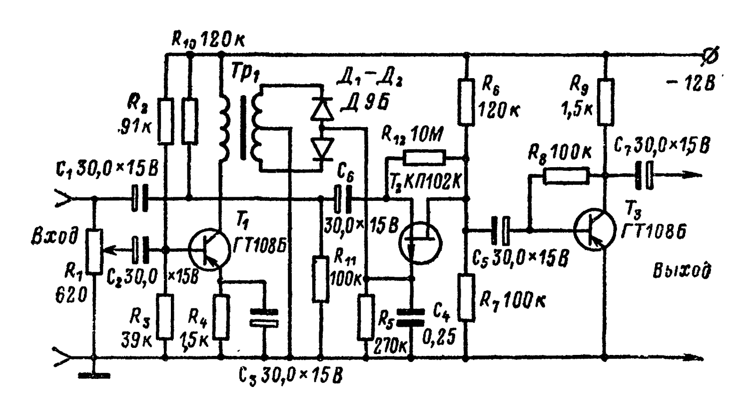


Рис. 37. Схема экспандера.

Для изготовления экспандера можно использовать схему, предложенную А. Игнатовым (рис. 37). Она позволяет расширить динамический диапазон с 40 до 60 дБ. Максимальное входное напряжение 100 мВ, максимальное выходное — 2,4 В; неравномерность частотной характеристики в диапазоне 30—15 000 Гц не более 1 дБ. В состав экспандера входят два усилительных каскада на транзисторах T_1 и T_3 и каскад, выполненный на полевом транзисторе T_2. Сопротивление между стоком и истоком полевого транзистора зависит от того, какое регулирующее напряжение приложено к его затвору. В данной схеме напряжение на затвор полевого транзистора подается с нагрузки выпрямителя звукового сигнала, собранного на диодах $Д_1$, $Д_2$. При увеличении уровня звукового сигнала увеличивается и напряжение на нагрузке выпрямителя, следовательно, увеличивается и напряжение на затворе транзистора T_2, которое включено встречно напряжению постоянного смещения, образующемуся на резисторе R_7. В результате уменьшается управляющее напряжение между истоком и затвором, что вызывает снижение сопротивления между стоком и истоком. Следовательно, с ростом входного сигнала снижается сопротивление канала и увеличивается коэффициент передачи полевого транзистора.

Первый усилительный каскад на транзисторе T_1 с трансформатором в коллекторной цепи предназначен для усиления сигналов, которые поступают на выпрямитель. Требуемое расширение динамического диапазона устанавливается с помощью переменного резистора R_1; чем больший сигнал поступает на вход транзистора, тем большее напряжение будет на выпрямителе и меньше сопротивление ка-

нала сток — исток и больше коэффициент усиления всего устройства, т. е. шире динамический диапазон. При использовании в схеме полевого транзистора типа КП102К с напряжением отсечки 5,4 В удается получить указанные характеристики экспандера при нелинейных искажениях до 1%. Бóльшее расширение динамического диапазона достигается при установке полевого транзистора с меньшим напряжением отсечки, например типа КП102Е. В этом случае удается расширить динамический диапазон с 20 до 60 дБ, но за счет увеличения коэффициента нелинейных искажений.

В качестве трансформатора Tp_1 можно применить согласующий трансформатор от радиоприемника «Селга» или выполнить его самостоятельно на сердечнике из пластин Ш5, толщина набора 6 мм. Первичная обмотка содержит 1000 витков, а вторичная 500+500 витков провода ПЭВ0,08. При настройке рабочие режимы усилительных каскадов устанавливают подбором сопротивлений резисторов $R_2(T_1)$ и $R_8(T_3)$.

БЛОК ПИТАНИЯ

Мощность усилителя и напряжение питания оконечного и предварительного усилителей являются исходными параметрами для расчета элементов блока питания и выбора его схемы. Мощность усилителя определяется из выражения

$$P_\Sigma = nP_{\text{ном}}/\eta, \qquad (16)$$

где $P_{\text{ном}}$ — выходная мощность одного канала; n — число каналов усилителя; η — коэффициент полезного действия усилителя.

В любительских расчетах значение η можно принять равным 0,5. По вычисленному значению мощности P_Σ выбирается силовой трансформатор.

Особенности эксплуатации высококачественных усилителей в жилых помещениях позволяют иначе подойти к определению параметров транзисторного стабилизатора напряжения питания, чем в случае, когда усилитель низкой частоты предназначен для работы на предельных режимах (например, использоваться как эстрадный усилитель для электрогитары). Прежде всего такой режим, как указывалось ранее, характеризуется тем, что средняя мощность, снимаемая с каждого канала, не превышает 1 Вт. Следовательно, средний ток, потребляемый усилителем во время работы, мало отличается от тока покоя. Но одновременно обязательным является отсутствие фона переменного тока во время пауз. Это достигается за счет обеспечения малых пульсаций на выходе блока питания. Например, при использовании для питания оконечного усилителя (см. рис. 9) нестабилизированного источника питания только с конденсаторами фильтра емкостью по 4000 мкФ напряжение шумов на выходе этого усилителя при закороченном входе составляло 2 мВ. При подключении громкоговорителя с сопротивлением 8 Ом отчетливо прослушивался фон переменного тока частотой 100 Гц хотя соотношение сигнал/шум было более 70 дБ, а мощность шумов всего $5 \cdot 10^{-7}$ Вт. При питании этого же усилителя от транзисторного стабилизированного источника напряжение шумов на выходе уменьшилось до 0,16 мВ, а фон и собственные шумы транзисторов совершенно не прослушивались. Этот эффект физически можно объяснить так. Тепловые шумы тран-

зисторов на выходе усилителя малы (см. рис. 10, *а*), и они оказались на порядок ниже фона переменного тока, и, следовательно, характерное для транзисторов шипение не смогло заглушить фон частотой 100 Гц.

Малый средний ток, потребляемый усилителем при эксплуатации в жилых помещениях, позволяет иначе выбирать режим работы транзисторного стабилизированного источника питания. В этом случае вторичная обмотка силового трансформатора должна обеспечивать переменное напряжение, равное или меньшее на 1—2 В постоянного напряжения питания оконечного усилителя. Известно, что после выпрямления на сглаживающих конденсаторах фильтра устанавливается постоянное напряжение, большее по величине переменного, если отсутствует потребитель тока. Это обеспечивает необходимый «излишек» напряжения для работы транзисторного стабилизатора напряжения. При малых значениях потребляемого тока имеется достаточный запас напряжения, который обеспечивает расчетный режим работы стабилизатора и малые пульсации напряжения питания на его выходе. По мере увеличения тока уменьшается напряжение на сглаживающих конденсаторах фильтра и «излишек» напряжения для работы регулирующего транзистора блока питания. При большом токе напряжение уменьшается и становится равным напряжению переменного тока во вторичной обмотке. Регулирующий транзистор переходит в режим насыщения, и стабилизатор напряжения прекращает свою работу. Величина пульсаций питающего напряжения будет в таком режиме работы определяться емкостью сглаживающих конденсаторов фильтра. Однако для работы усилителя это не существенно. Большой ток потребляется при значительном выходном сигнале, а в этом случае фон переменного тока не будет прослушиваться. Например, если напряжение питания оконечного усилителя составляет 30 В, то на вторичной обмотке устанавливаем переменное напряжение 30 В. После выпрямителя в холостом режиме на сглаживающем конденсаторе фильтра установится напряжение около 42 В. Следовательно, при малых токах имеется излишек напряжения в 12 В, необходимый для нормальной работы транзисторного стабилизатора напряжения. Такой режим работы стабилизатора увеличивает коэффициент полезного действия блока питания и уменьшает мощность, рассеиваемую на регулирующем транзисторе. Это объясняется тем, что с ростом потребляемого тока уменьшается падение напряжения на регулирующем транзисторе. При максимальном токе этот транзистор находится в режиме насыщения, а если этот транзистор германиевый, то падение напряжения не превышает 0,5—1 В.

Ток, который должен обеспечивать транзисторный стабилизированный источник, определим из равенства

$$I_\Sigma = P_\Sigma / E. \tag{17}$$

Если используется двухпериодная или мостовая схема выпрямителя, то диаметр провода вторичной обмотки силового трансформатора рассчитывается исходя из максимального тока нагрузки, равного I_Σ, так как переменное напряжение, развиваемое на ней, приблизительно равно E.

В том случае когда усилитель эксплуатируется длительное время с максимальной выходной мощностью, необходимо проводить бо-

лее точный расчет, например, по номограммам [5] и обеспечивать необходимый запас по мощности блока питания.

Для питания оконечных усилителей, выходной каскад которых выполнен по схемам на рис. 3, *а* и рис. 13, можно применить транзисторный стабилизированный источник питания с защитой от короткого замыкания от усилителя НЧ «Радуга» (рис. 38). В этом блоке питания для стабилизации напряжения используется составной транзистор, выполненный на двух транзисторах T_1 и T_2, причем в базу последнего включены стабилитроны $Д_5$—$Д_8$. Изменяя их

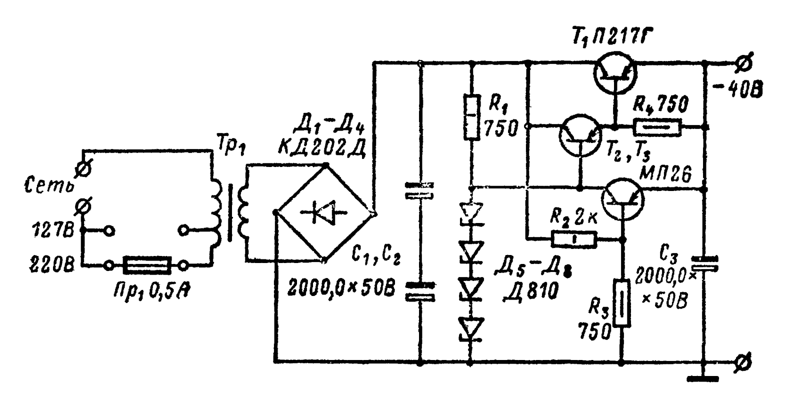


Рис. 38. Схема стабилизированного источника питания с защитой от короткого замыкания.

число или тип, можно регулировать величину стабилизированного напряжения. Следует иметь в виду, что при этом необходимо соответственно изменять и напряжение на вторичной обмотке трансформатора.

Для защиты от короткого замыкания предназначен транзистор T_3. В нормальном режиме он заперт, так как на его эмиттере напряжение —40 В. При коротком замыкании эмиттер транзистора T_3 соединяется с нулевым проводом и напряжение на нем падает до нуля. Это приводит к тому, что транзистор T_3 отпирается, а транзисторы T_1 и T_2 запираются. В результате ток через выпрямитель будет ограничен и не превысит предельного значения. Уменьшить напряжение пульсаций на выходе этого стабилизатора можно, если резистор R_1 заменить двумя с таким же суммарным сопротивлением и к средней точке подключить конденсатор емкостью 50—1000 мкФ и напряжением 50 В.

Для питания усилителей с общей динамической точкой (см. рис. 9, 11) применяются два стабилизатора, которые обеспечивают равные напряжения относительно нулевого провода. В качестве исходных использовались схемы стабилизаторов, разработанные С. Назаровым. Для обеспечения большого тока в схеме стабилизатора (рис. 39) применены составные регулирующие транзисторы.

Отличительной особенностью указанных стабилизаторов является то, что опорный стабилитрон включен после регулирующего транзистора. В результате этого пульсации от входного напряжения на

нем малы, а следовательно, и уменьшается дестабилизирующее влияние источника питания на весь стабилизатор по сравнению со схемой на рис. 38.

В схеме с нулевой точкой по сравнению со схемой на рис. 38 можно использовать электролитические конденсаторы с вдвое меньшим напряжением. Если электролитические конденсаторы установлены типа К50-6 емкостью 4000 мкФ и напряжением 25 В после выпрямителя, то переменное напряжение в каждом плече вторичной

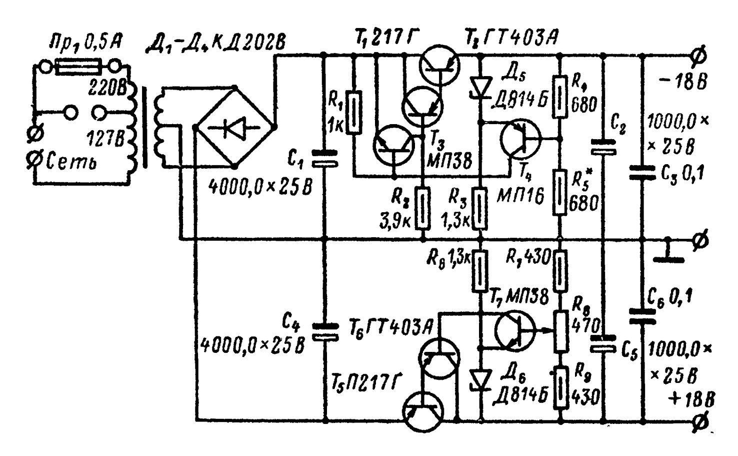


Рис. 39. Схема блока питания с нулевой точкой.

обмотки должно выбираться не более 17 В. При превышении этого значения постоянное напряжение на сглаживающих конденсаторах фильтра при малых токах будет превышать 25 В и возможен их пробой.

Подбором сопротивления резистора R_5 устанавливают отрицательное напряжение, равное 18±0,5 В. В любительских конструкциях часто для регулирования выходного постоянного напряжения применяют переменные резисторы. Для примера можно сравнить регулировку отрицательного (резисторы R_4 и R_5) и положительного (резисторы $R_7 - R_9$) напряжений в приведенном блоке. Для установки величины положительного напряжения предназначен переменный резистор R_8. Это объясняется тем, что необходимо установить равные напряжения относительно нулевого провода, для чего и используется переменный резистор. Если регулировку осуществлять подбором постоянных резисторов, то эта операция требует много времени, достаточного опыта и квалификации радиолюбителя.

Для источника питания с нулевой точкой можно использовать трансформатор и без отвода от средней точки вторичной обмотки. Схема блока питания с таким трансформатором показана на рис. 40. В этом случае вторичная обмотка трансформатора должна быть рассчитана на вдвое больший ток, чем в предыдущей схеме. Кроме того, следует учесть, что у стабилизатора, собранного по этой схеме, пульсации на выходе будут больше, чем у двух предыдущих.

Основное преимущество этого блока питания заключается в простоте силового трансформатора.

Схемы транзисторных стабилизаторов напряжения не отличаются от разобранных выше. Равенства напряжений в плечах относительно нулевого провода добиваются подбором стабилитронов $Д_3$—$Д_6$.

Если нет мощного транзистора с проводимостью типа *n-p-n*, то для регулировки положительного напряжения можно применить сле-

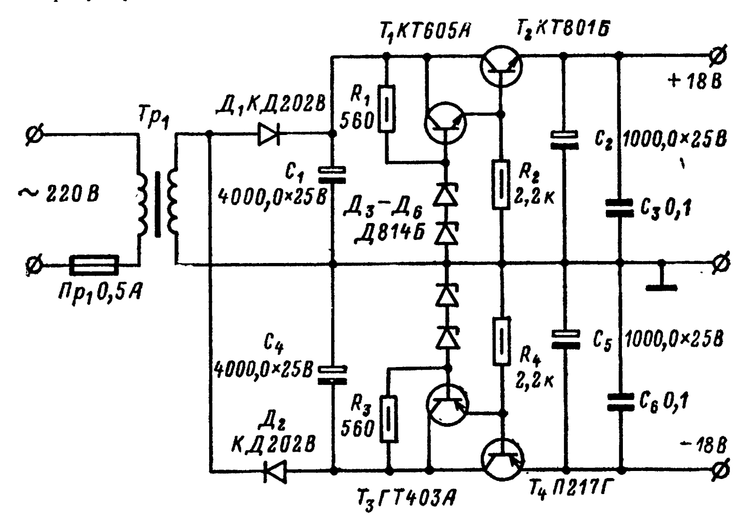


Рис. 40. Схема блока питания без отвода от середины вторичной обмотки трансформатора.

дующую схему стабилизатора (рис. 41). В отличие от схемы на рис. 40 здесь для регулирования предназначен мощный транзистор с проводимостью типа *p-n-p*. Если данный стабилизатор предназначен для работы при токах нагрузки до 1 А, то в усилителе постоянного тока можно применить транзистор T_2 типа МП35—МП38.

При желании радиолюбитель может ввести защиту от короткого замыкания во все схемы (подобную показанной на рис. 37). Но не следует забывать, что одним из наиболее простых средств защиты от коротких замыканий являются плавкие предохранители. В конструкции усилителя следует обязательно предусмотреть установку плавких предохранителей в цепях питания каждого канала усилителя.

Установка плавких предохранителей для защиты от короткого замыкания регулирующего транзистора стабилизатора является достаточной мерой, если используются германиевые низкочастотные транзисторы типов П213—П217 и П210.

Если в стабилизаторе не предусмотрена защита от короткого замыкания, то для ограничения тока, потребляемого усилителем (нагрузкой), можно использовать ограничитель тока (рис. 42). Подбором резистора R_1 устанавливают максимальный ток через нагрузку.

Для источника питания с нулевой точкой в положительном проводе питания устанавливается аналогичный ограничитель, собранный на транзисторе с проводимостью типа *n-p-n* (например, КТ801, П701). Эти транзисторы должны устанавливаться на небольших радиаторах. Их можно также закрепить (с изолирующей прокладкой) и на радиаторах регулирующих транзисторов стабилизаторов.

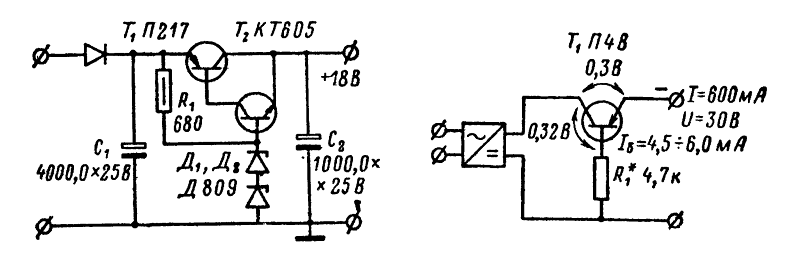


Рис. 41. Схема транзисторного стабилизатора.

Рис. 42. Схема ограничителя тока.

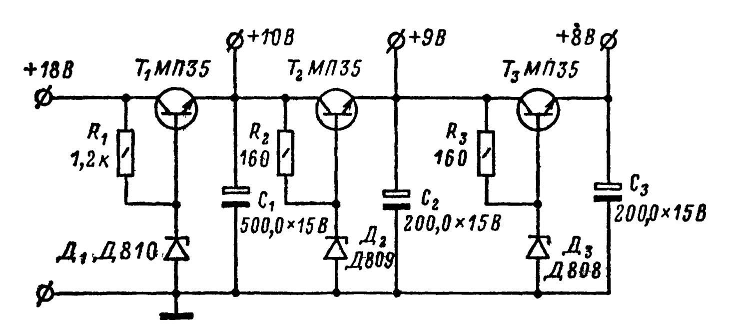


Рис. 43. Схема транзисторного стабилизатора для питания каскадов предварительного усилителя.

Питание каскадов предварительного усилителя осуществляется от отдельного транзисторного стабилизированного источника, причем для каждого каскада применяется отдельный стабилизатор (рис. 43). Такое построение схемы блока питания предварительных каскадов позволяет устранить нежелательные обратные связи по цепям питания между отдельными каскадами, полностью исключить установку на платах предварительных усилителей электрических конденсаторов цепей питания и уменьшить пульсации питающего напряжения. Размеры печатных плат предварительных усилителей уменьшаются, так как обычно эти электролитические конденсаторы являются самыми громоздкими деталями. Кроме того, при создании многоканальных усилителей (например, квадрафонических) это сокращает число необходимых для всего усилителя электролитических конденсаторов. Покажем это. Если использовать общепринятый метод построения цепей питания каскадов предварительного усили-

теля (см. рис. 22), то в каждом канале необходимо установить гасящий резистор между первым и вторым каскадами и у первого каскада электролитический конденсатор. Для стереофонического усилителя в этом случае необходимо два резистора и два конденсатора, а для квадрафонического — четыре резистора и четыре конденсатора. В предлагаемой же схеме (см. рис. 43) используется только один конденсатор, резистор, транзистор и стабилитрон.

При выборе гасящих резисторов R_1, R_2, R_3 надо исходить из того, что ток через стабилитроны должен быть в пределах 5—7 мА. Следует также иметь в виду, что схема стабилизатора с регулирующим транзистором обеспечивает меньшие пульсации напряжения на выходе по сравнению со стабилизаторами, выполненными на одном стабилитроне или с применением гасящих резисторов.

Некоторое усложнение схемы блока питания позволяет уменьшить число дефицитных деталей (электролитические конденсаторы большой емкости и малых габаритов) и улучшает параметры питающего напряжения прежде всего за счет уменьшения пульсаций.

Данная схема предназначена для питания предварительного усилителя, имеющего три каскада, например два каскада усиления напряжения (см. рис. 22), и предварительного усилителя для электромагнитного звукоснимателя (см. рис. 26). Когда требуется иметь большее число ступеней, то можно, например, установить последовательно каскады со стабилитронами типа Д814А—Д814Г.

В ряде статей [3, 4] высказывается мнение, что использование оконечного усилителя, собранного по схеме без разделительного конденсатора (см. рис. 9, 11), позволяет применять нестабилизированный источник питания, в котором после выпрямительных диодов устанавливаются только электролитические конденсаторы большой емкости, обычно 4000 мкФ. Это положение требует пояснения. Прежде всего шумы на выходе оконечных усилителей при одинаковых источниках питания зависят от коэффициентов усиления усилителей. Для этого были проведены измерения шумов на выходе оконечного усилителя (см. рис. 9) при закороченном входе и при различных коэффициентах усиления милливольтметром В3-39. Коэффициент усиления устанавливался изменением сопротивления резистора R_6, входящего в цепь отрицательной обратной связи. Результаты измерений сведены в табл. 4.

Таблица 4

Сопротивление резистора	K_u	U мВ	Примечание
430 Ом	21	2,0	Фон слышен
1,1 кОм	10	1,1	Фон едва слышен
2 кОм	5,5	0,72	Фон не слышен

Если коэффициент усиления оконечного усилителя выбрать малым ($K_u<10$), то можно для его питания применить нестабилизированный источник. Однако это требует соответственного увеличения коэффициентов усиления каскадов предварительного усилителя, так как суммарный коэффициент усиления всего усилительного тракта должен остаться прежним. Одновременно увеличивается значение

$U_{0\,у}$. Это в свою очередь требует повышения напряжения питания каскадов предварительного усилителя. Следовательно, при разработке схемы усилителя и распределения коэффициента усиления по его каскадам необходимо принимать во внимание напряжения, которые обеспечивает выбранная схема блока питания.

КОНСТРУКЦИЯ И ДЕТАЛИ УСИЛИТЕЛЯ

Обычно высококачественный усилитель низкой частоты выполняют в виде отдельного блока. Размеры этого блока в первую очередь определяются габаритами деталей, из которых он состоит. Это прежде всего силовой трансформатор, радиаторы мощных выходных транзисторов, электролитические конденсаторы фильтра блока питания, спаренные резисторы регуляторов тембра и уровня громкости, которые могут занимать до 70% объема и более. Если габариты устройства не ограничены жесткими требованиями, то это дает возможность более широкого выбора типа необходимых деталей. В том случае, когда необходимо получить минимальные размеры устройства, приходится использовать только малогабаритные детали, например силовой трансформатор на торовом сердечнике, электролитические конденсаторы типа К50-6. Габариты корпуса усилителя должны быть также увязаны с размерами уже существующих блоков (магнитофона, электропроигрывателя и др.). Если усилитель предназначается для совместной работы со стереофоническим проигрывателем, то они могут быть размещены в общем корпусе, причем размеры его выбираются исходя из габаритов платы проигрывателя. Дополнительные устройства (экспандер, многоканальный регулятор тембра и др.) по желанию конструктора могут быть оформлены в виде отдельных конструкций или же находиться в одном корпусе с усилителем. Все указанные требования позволяют определить желаемые габариты усилителя, которые уточняются в процессе его изготовления.

Условия эксплуатации также оказывают значительное влияние на выбор конструкции устройства. Примем за основное стационарное размещение всех устройств. Все органы управления желательно вынести на переднюю панель усилителя. Шнур сетевого питания, разъемы для подключения громкоговорителей, держатели предохранителей находятся на задней стенке. Место расположения разъемов для подсоединения источников сигнала и дополнительных устройств выбирается конструктором. Согласно ГОСТ 12392-71 в усилителях первого класса для подключения каждого источника сигнала должен предусматриваться отдельный разъем. Это требование не всегда оправдано для любительских конструкций. Очевидно, что одновременно усилитель может воспроизводить сигнал только от одного источника. Следовательно, число разъемов можно уменьшить до минимально необходимого, а переключателем рода работ выбирать требуемый источник. В соответствии с изложенным минимальные размеры передней панели усилителя будут определяться удобством расположения органов управления и стрелочных индикаторов выхода.

Для удобства обслуживания и монтажа все блоки и элементы усилителя размещают на общем основании, изготовляемом из листового гетинакса или текстолита толщиной 4—5 мм. Порядок компоновки усилителя определяется общими принципами размещения элементов электронных устройств [8]. На рис. 44 показан монтаж сте-

реофонического усилителя, который размещается в одном корпусе со стереофоническим электропроигрывателем типа II-ЭПУ-32С (или II-ЭПУ-52С). Размеры текстолитовой платы имеют размеры 360×260×5 мм.

Для крепления органов управления и переменных резисторов используется закрепленный вертикально с помощью уголка лист дюралюминия с размерами 360×100×2 мм, являющийся одновременно экраном. Он обязательно должен соединяться с нулевым проводом

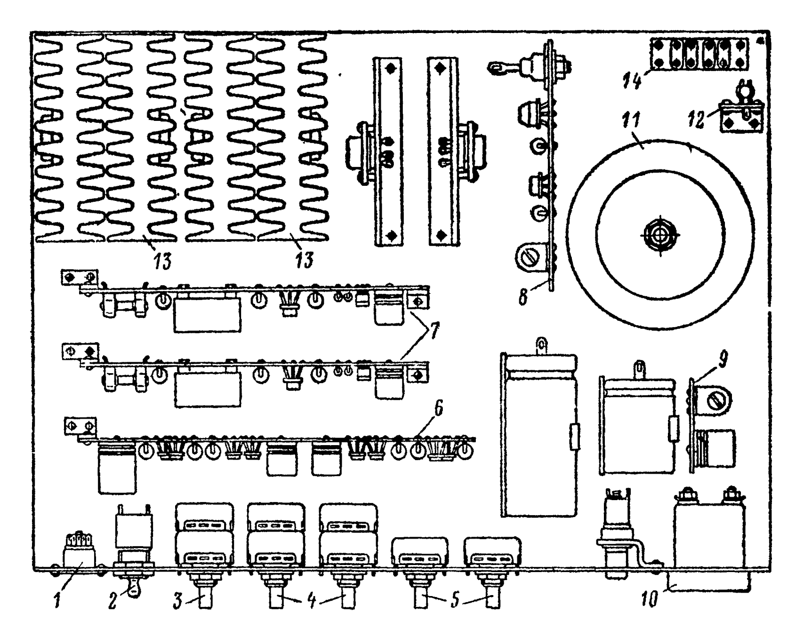


Рис. 44. Вид на монтаж стереофонического усилителя

1 — входной разъем; 2 — переключатель источников сигнала; 3 — регулятор уровня; 4 — регулятор тембра; 5 — регуляторы стереобаланса; 6 — плата предварительных усилителей; 7 — платы оконечных усилителей; 8 — плата блока питания; 9 — плата индикаторов выхода; 10 — стрелочный индикатор; 11—силовой трансформатор; 12 — плата с предохранителями; 13 — радиаторы; 14—зажимы для подключения нагрузки.

только в одной точке. При монтаже переменных резисторов на изоляционном материале с нулевым проводом соединяют и элементы крепления переменных резисторов, так как в противном случае появляется фон переменного тока при прикосновении рукой к их оси.

С левой стороны передней панели размещают низкочастотный разъем типа СШ-5 (ГОСТ 12368-66) и переключатель источников сигналов. Затем располагают спаренные резисторы регулятора уровня, установленного на входе предварительного усилителя (см. рис. 2), и регуляторы тембра низких и высоких частот. Далее выведены ручки переменных резисторов, левого и правого каналов, включенных

между предварительным и оконечным усилителями. С правой стороны укрепляют стрелочные индикаторы выхода (два прибора типа М4203) и лампочку — указатель включения питания. С целью уменьшения длины соединительных проводов плату с предварительными усилителями устанавливают рядом со спаренными переменными резисторами. Далее вертикально закрепляют две платы око-

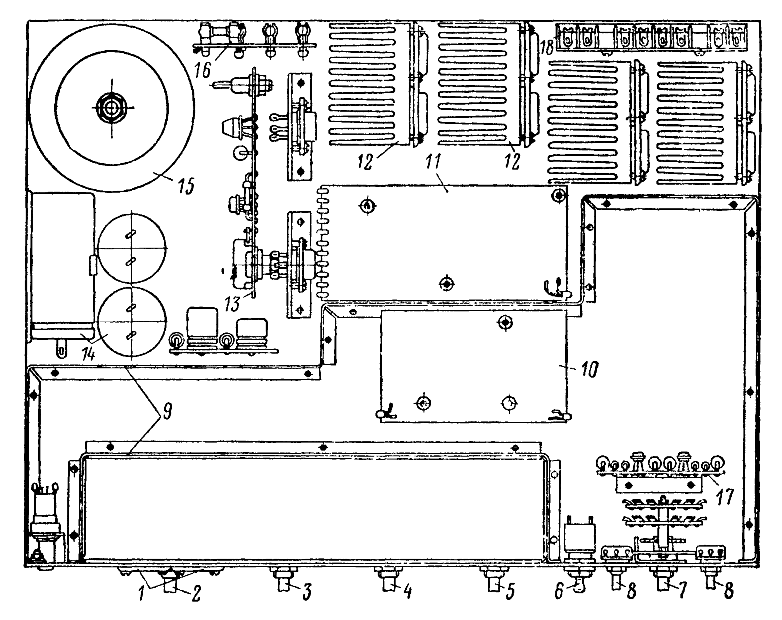


Рис. 45. Вид на монтаж квадрафонического усилителя.

1 — входные разъемы; *2* — переключатель источников сигнала; *3* — регулятор уровня; *4*, *5* — регуляторы тембра НЧ, ВЧ; *6* — выключатель дифференциального каскада; *7* — переключатель контроля работы каналов; *8* — резисторы регулятора стереобаланса; *9* — экран; *10* — платы предварительных усилителей; *11* — платы оконечных усилителей; *12* — радиаторы выходных транзисторов; *13* — плата блока питания; *14* — конденсаторы блока питания; *15* — силовой трансформатор; *16* — плата с предохранителями; *17* — плата дифференциального каскада; *18* — зажимы для подключения нагрузки.

нечных усилителей. Вдоль задней стенки размещают радиаторы мощных выходных транзисторов и радиаторы транзисторов блока питания.

Рядом со стрелочными индикаторами выхода закрепляют печатную плату с деталями индикаторов выхода. Как можно дальше от входных цепей, справа закрепляют силовой трансформатор и печатную плату выпрямителя и стабилизаторов. С правой стороны у задней стенки располагают зажимы для подключения громкоговорителей и стойки с держателями сетевых плавких предохранителей. Держатели предохранителей блока питания закреплены на печатных платах оконечных усилителей. Общая высота усилителя определяется размерами радиаторов и составляет 100 мм.

Аналогичное размещение деталей и узлов имеет и четырехканальный усилитель для квадрафонической системы (рис. 45). Усилитель смонтирован на листе гетинакса с размерами 380×285×4 мм. Передняя панель выполнена из дюралюминия с размерами 380×80×2 мм; на ней закреплены неоновая лампа типа ИН-2 — индикатор включения сети, входные разъемы типа СШ-5 и органы управления. В качестве переключателя рода работ, регулятора уровня, регуляторов тембра и переключателя контроля работы каждого канала использованы галетные переключатели типа 11П4Н и 5П4Н. Для регулировки стереобаланса использованы четыре отдельных переменных резистора типа СП-3-4 сопротивлением по 47 кОм, размещенные вокруг переключателя контроля работы каждого канала. Этот переключатель включен между предварительными и оконечными усилителями (рис. 46) и позволяет прослушивать работу каждого канала в отдельности и всех вместе. Рядом расположен переключатель *Квадрафония* (4) — *Псевдоквадрафония* (2+2).

Так как для регулировки уровня входного сигнала и тембра применены галетные переключатели, то они должны быть помещены в экран. С целью уменьшения габаритов устройства платы предварительных и оконечных усилителей размещают одну над другой в четыре этажа и крепят с помощью вертикально расположенных болтов М4. Зазоры между платами выдерживают с помощью алюминиевых втулок высотой 16 мм. Для уменьшения наводок платы предварительных усилителей и дифференциального каскада (см. рис. 45) отделены перегородкой из листового алюминия, соединенной с передней панелью. С левой стороны у задней стенки закрепляют силовой трансформатор и детали блока питания. Электролитические конденсаторы фильтра большой емкости с помощью хомутов крепят на общей плате усилителя.

Вдоль задней стенки установлены четыре радиатора, на которых попарно закреплены выходные транзисторы. Поверхность охлаждения радиатора 600 см^2, размеры 62×68×43 мм. На этих же радиаторах укреплены элементы цепей стабилизации тока покоя оконечных транзисторов (см. рис. 9). На задней стенке крепят плату с держателями предохранителей (по два на каждый канал и сетевой) и винтовые зажимы для подсоединения громкоговорителей. Соединение между предварительными и оконечными усилителями, регуляторами стереобаланса, регуляторами тембра и входными цепями выполняют экранированным проводом. Вертикально расположенные печатные платы закрепляют с помощью уголков винтами М3. Каждый радиатор привинчивают к основанию двумя винтами М4. В качестве радиаторов регулирующих транзисторов блока питания (см. рис. 45) применяют алюминиевые (медные) пластинки с размерами 40×70×3 мм.

В настоящее время большинство транзисторных конструкций монтируют на печатных платах из фольгированного гетинакса или стеклотекстолита. Последний наиболее предпочтителен, так как платы из фольгированного стеклотекстолита допускают большее количество перепаек, а это важно при настройке усилителя с подбором элементов. Печатные платы обычно изготовляют в любительских условиях травлением в хлорном железе [10].

Стабилизаторы напряжения блока питания и диоды выпрямительного моста (см. рис. 39) монтируют на одной печатной плате (рис. 47). Данная плата рассчитана на установку резисторов типа МЛТ-0,5 и МЛТ-0,25, конденсаторов C_3, C_6 типа МБМ или БМ-2.

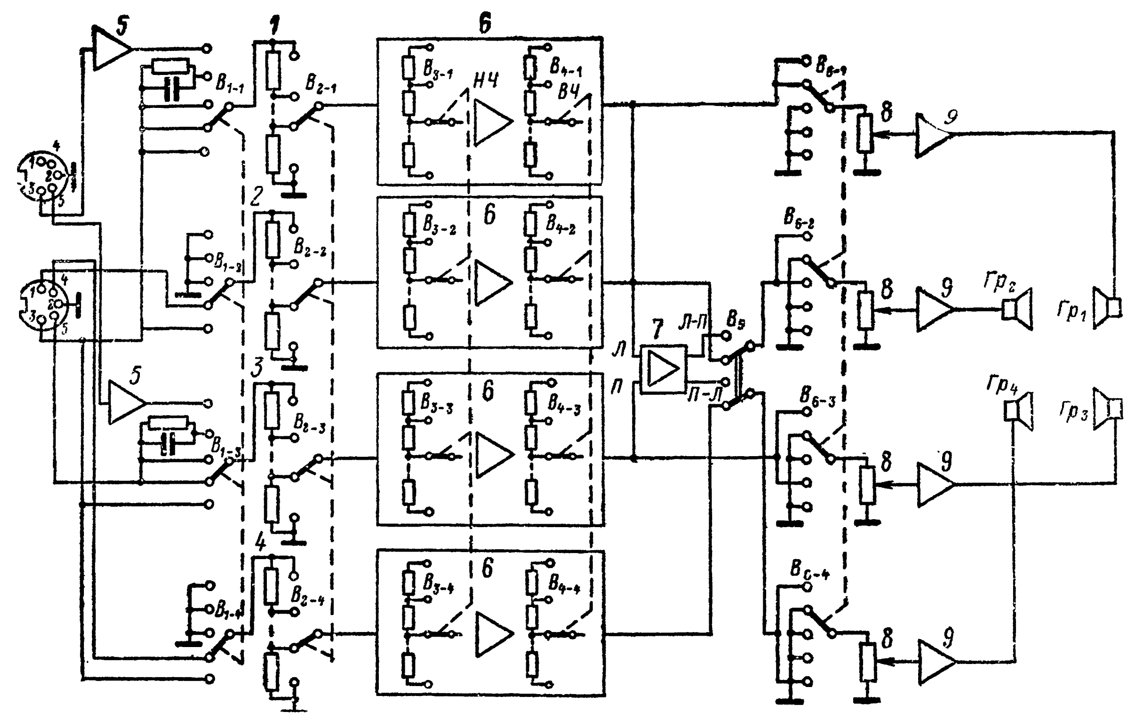


Рис. 46. Функциональная схема квадрафонического усилителя.

1—4 — каналы усилителя; *5* — дополнительный предварительный усилитель для электромагнитного звукоснимателя; *6* — предварительный усилитель; *7* — дифференциальный каскад; *8* — регуляторы стереобаланса; *9* — оконечный усилитель; B_1 — переключатель источников сигналов; B_2 — регулятор уровня; B_3 и B_4 — регуляторы тембра НЧ и ВЧ; B_5 — переключатель *Квадрафония* (4) — *Псевдоквадрафония* (2+2); B_6 — переключатель контроля работы каналов.

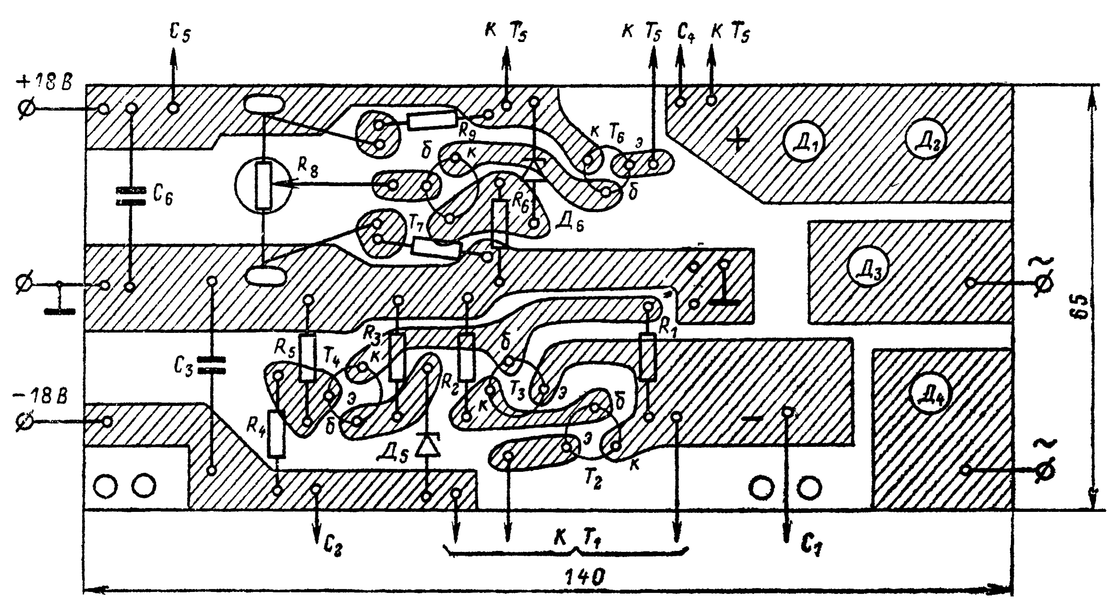


Рис. 47. Печатная плата блока питания.

Таблица 5

Схема элемента	Порядковый номер	Типы элементов
Рис. 39	T_1	П213, П214, П216, П217, П209, П210 с любым индексом
	T_2	П213, П214, П201
	T_3	МП35, МП36, МП37, МП10
	T_4	МП42, МП13, МП14, МП39, МП40
	T_5	П213 — П217, П210 с любым индексом
	T_6	П213, П214, П201 с любым индексом
	T_7	МП35 — МП38, МП8 — МП11
	$Д_1—Д_4$	КД202Д, КД202Ж, КД202К, КД202М, КД202Р; Д302; Д242
	$Д_5$, $Д_6$	Д809, Д810
Рис. 40	T_1	КТ801, КТ807
	T_2	КТ802, П701, П702
	T_3	П213, П214, П201
	T_4	П213 — П217, П210 с любым индексом
	$Д_1$, $Д_2$	КД202Д, Ж, К, М, Р; Д302; Д242
	$Д_3—Д_6$	Д809
Рис. 43	T_1, T_2, T_3	МП36, МП37, МП38, МП9, МП10, МП11 с любым индексом
	$Д_1$	Д814В
	$Д_2$	Д814Б
	$Д_3$	Д814А

Переменный резистор R_8 использован типа СП-0,5, электролитические конденсаторы фильтра — типа К50-6. Можно использовать электролитические конденсаторы и других типов, однако в этом случае увеличатся габариты всего устройства. В крайнем случае допускается применение конденсаторов с меньшей емкостью, однако это приведет к увеличению пульсаций питающего напряжения на выходе стабилизаторов. Рекомендуемая схема не критична к типу используемых транзисторов. В табл. 5 приведены типы транзисторов и диодов, которые могут быть использованы вместо указанных в схемах стабилизаторов.

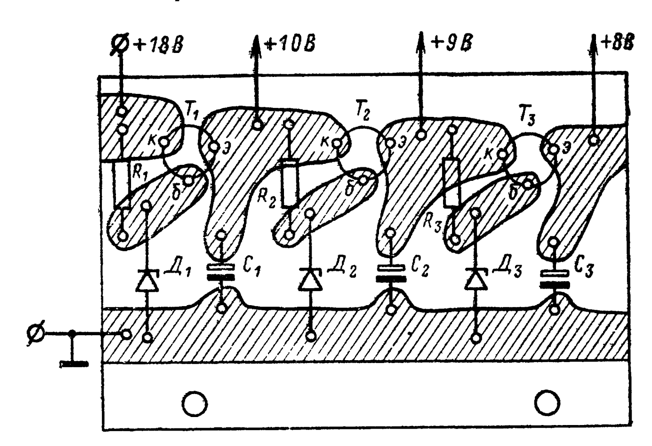


Рис. 48. Печатная плата стабилизаторов напряжения для питания каскадов предварительного усилителя.

Если усилитель предназначен для работы в течение длительного времени с максимальной выходной мощностью, то транзисторы T_1 и T_5 (см. рис. 39) желательно использовать типа П209 или П210, снабдив их радиаторами с поверхностью охлаждения не менее 500 см². В этом случае каждый из диодов выпрямительного моста $Д_1$—$Д_4$ следует установить на отдельный изолированный радиатор или на общем радиаторе с изолирующими слюдяными прокладками. Для диодов типа КД202В рекомендуются радиаторы из алюминия или меди в виде пластин толщиной 3 мм и площадью 10 см² при токе до 3 А и 25 см² при токе до 4 А. При размещении элементов блока питания следует обратить внимание на то, чтобы электролитические конденсаторы фильтра не находились рядом с радиаторами регулирующих транзисторов.

На отдельной печатной плате (рис. 48) смонтированы транзисторные стабилизаторы напряжения для питания каскадов предварительного усилителя (см. рис. 43). Число стабилизаторов зависит от количества каскадов предварительного усилителя. Обе печатные платы устанавливают с помощью уголков вертикально и крепят винтами М3 к основанию.

Потребляемый усилителями ток, напряжение на вторичной обмотке трансформатора и суммарная мощность P_Σ являются исход-

ными данными, позволяющими с помощью графиков [5] рассчитать силовой трансформатор. В любительских условиях часто используют готовый силовой трансформатор от лампового радиоприемника. В этом случае его разбирают и с каркаса удаляют все обмотки, кроме сетевой. Используя номограмму [5], по известному значению потребляемого тока определяют диаметр провода вторичной обмотки. Число витков этой обмотки легко рассчитать, если известны паспортные данные трансформатора. Если их нет, то при разборке трансформатора необходимо посчитать число витков в обмотке накала ламп, а так как это напряжение приблизительно равно 6,5—7, то дальнейший перерасчет уже не составит труда.

В предложенных конструкциях блока питания усилителей силовой трансформатор собран из пластин Ш20; толщина набора 40 мм. Первичная обмотка содержит 900+650 витков провода ПЭВ 0,35 мм, а вторичная 2×110 витков ПЭВ 1,0. Для получения равных напряжений в обоих половинах вторичной обмотки ее выполняют одновременно двумя проводами.

Для блока питания, выполненного по схеме на рис. 38, рекомендуется использовать силовой трансформатор с сердечником из пластин Ш20 и толщиной набора 40 мм. Сетевая обмотка его содержит 740+560 витков провода ПЭВ-2 диаметром 0,49 и 0,35 мм соответственно. Вторичная обмотка выполнена проводом ПЭВ-2 диаметром 1,0 мм и имеет 232 витка с отводом от 28-го витка.

При изготовлении блока питания с силовым трансформатором без отвода от середины вторичной обмотки (см. рис. 40) удобно использовать заводские трансформаторы типа ТБС-2-0,05 мощностью 50 В·А с обмотками, рассчитанными на напряжение 220 и 18 В. Эти трансформаторы компактны, имеют малые габариты и удобные фланцы для крепления.

Силовой трансформатор можно выполнить и на торовом сердечнике ОЛ50/80-40 из стали Э320. Первичная обмотка рассчитана на напряжение 220 В и содержит 1220 витков провода ПЭВ-2 диаметром 0,31 мм, а вторичная — 2×103 витка провода ПЭВ-2 диаметром 0,8 мм. При намотке этого трансформатора можно применять только межобмоточную и наружную изоляцию. Для этого рекомендуется использовать фторопластовую пленку ПЭТФ толщиной 0,01—0,02 мм, лакоткань ЛШСС толщиной 0,06—0,12 мм или батистовую ленту.

Каждый оконечный усилитель (см. рис. 9) собран на печатной плате (рис. 49). В том случае, если выходные транзисторы установлены на радиаторе с поверхностью охлаждения более 1200 см^2, элементы температурной стабилизации тока покоя транзисторов можно монтировать на самой печатной плате. Если поверхность радиатора меньше, то диоды $Д_2$, $Д_3$ и транзистор T_4 следует устанавливать на нем. Для этого в радиаторе сверлят отверстия диаметром 4,5—5 мм и с помощью нитрокраски закрепляют в них диоды. Для установки транзистора T_4 на радиаторе необходимо просверлить отверстие диаметром 9 мм и глубиной не менее 10 мм. В это отверстие вставляют транзистор и также закрепляют с помощью нитрокраски (можно применять любой изоляционный клей, герметик, лак или краску). В этом случае выводы диодов и транзистора с помощью гибких проводов подпаивают к соответствующим точкам на печатной плате.

В усилителе использованы следующие детали: резисторы типа МЛТ-0,5, МЛТ-0,25, конденсаторы C_5—C_8 типа МБМ, электролитические конденсаторы типа К50-6 и К50-3 (C_1, C_4). Проволочные

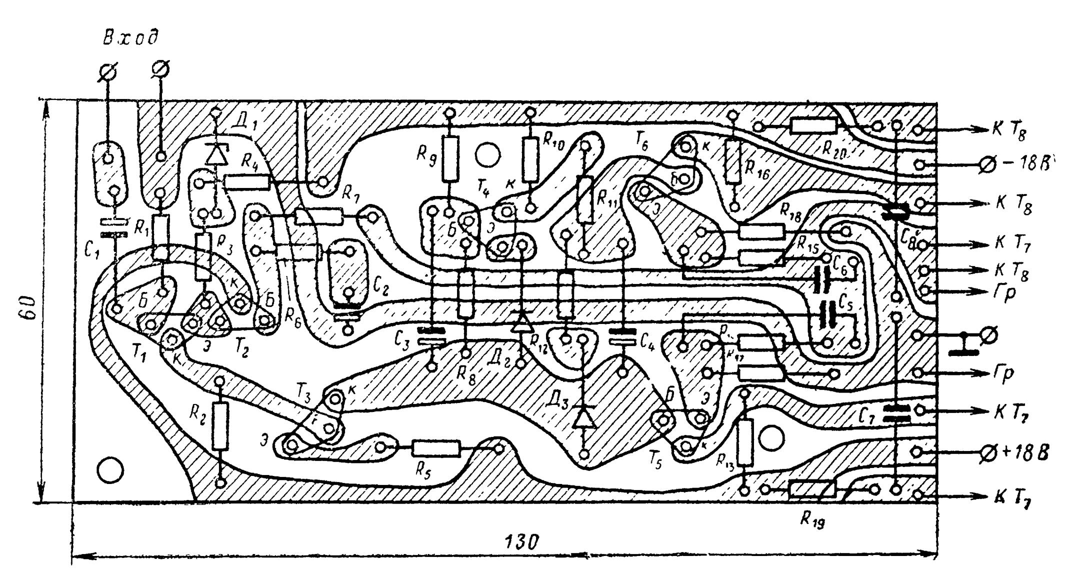


Рис. 49. Печатная плата оконечного усилителя.

резисторы R_{19}, R_{20} изготовлены из нихромовой проволоки диаметром 0,2—0,3 мм и длиной около 5 см.

Значительным преимуществом данной схемы оконечного усилителя является то, что она не критична к типу применяемых транзисторов и допускает возможность замены без дополнительной регулировки. В табл. 6 указаны варианты возможных типов транзисторов и диодов, которые могут быть использованы в оконечном усилителе.

Таблица 6

Порядковый номер элемента	Типы элементов
T_1, T_2	КТ312Б, КТ315Г
T_3	П601, П602, П606, П607, ГТ402, ГТ403
T_4	П402, П403, П416, МП42, МП16, МП25, МП26 с любым индексом
T_5	КТ602Б, КТ605, КТ801, П701, ГТ404
T_6	П602, П605 — П608, ГТ402, ГТ403
T_7	КТ803, КТ805, КТ903, КТ808, П701, П702
T_8	ГТ703В, ГТ804, П213, П214, П203, П216, П217
$Д_1$	Д809, Д814Б, Д814В

При изменении напряжения питания, а также при замене типов транзисторов (с меньшей мощностью) необходимо с помощью приведенных зависимостей провести поверочный расчет усилителя и определить мощности, рассеиваемые на транзисторах. Если в результате расчетов окажется, что они выше допустимых для выбранных типов транзисторов, установленных без радиаторов (T_6, T_5), то необходимо заменить печатную плату, предусмотрев на ней место и для радиаторов, или вынести их с этой платы, установив на отдельных радиаторах. Поверхность охлаждения этих радиаторов рассчитывают по графикам и формулам [2]. Аналогично проводят расчет и для выходных транзисторов и уточняют размеры их радиаторов. Очевидно, что при замене высокочастотных транзисторов типа ГТ806 на низкочастотные типа П203 резко увеличиваются искажения на частотах выше 5 кГц.

На рис. 50 показана печатная плата предварительного усилителя (см. рис. 22). В усилителе применены постоянные резисторы типа МЛТ-0,5 и МЛТ-0,25, конденсаторы блока регуляторов тембра типов МБМ, БМ-2 или керамические, электролитические конденсаторы типа К50-6, конденсатор C_1 — К50-3. При использовании электролитических конденсаторов другого типа необходимо внести изменения в печатную плату. Размеры платы можно уменьшить, если конденсаторы C_3 и C_4 закрепить на выводах переменного резистора регулятора тембра низких частот. В этой плате, как в плате для оконечного усилителя, выполнено три отверстия диаметром 4,5 мм для ее крепления в горизонтальном положении болтами М4 (см. рис. 45).

При подборе транзисторов для предварительного усилителя необходимо учесть особенности работы этих каскадов. Транзистор T_1 (см. рис. 22) имеет малый ток коллектора $I_к$ (0,05—1 мА), поэтому он должен обладать большим коэффициентом усиления по току.

Коллекторный ток транзистора T_1 является базовым для транзистора T_2, поэтому $I_{к0}$ транзистора T_1 не должен превышать 2 мкА. Если же он больше указанного значения, то между базой и эмиттером транзистора T_2 необходимо включить резистор сопротивлением 1,5—3 кОм. Коллекторный ток транзистора T_2 не должен превышать 100 мкА.

В качестве транзистора T_1 в таких каскадах желательно применять кремниевые транзисторы типов МП113А, КТ301Ж, КТ315, КТ312 с любыми буквенными индексами, а в качестве T_2 — любые маломощные транзисторы (П401, П403, П416, ГТ305Б).

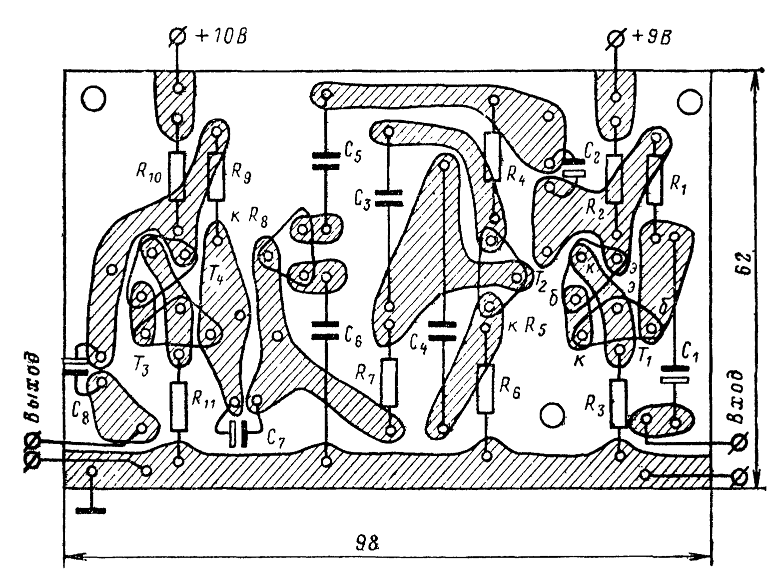


Рис. 50. Печатная плата предварительного усилителя.

Для регулирования тембра в стереофоническом усилителе лучше использовать спаренные переменные резисторы СП3-12 или СП3-7 типа В, которые обеспечивают требуемую плавность регулировки. Переменные резисторы тембра блока с платой усилителя соединяют с помощью специально изготовленных трехжильных экранированных проводов. Для получения меньших габаритов в общий экран помещают три тонких гибких провода во фторопластовой изоляции.

Особое внимание следует обратить на правильность монтажа и экранирования входных цепей предварительного усилителя. Нарушение экранировки может привести к появлению фона переменного тока. Причиной этого является неправильное заземление входных экранированных проводов, которое выполняется в нескольких точках, а не у входного транзистора.

На рис. 51 приведен пример выполнения монтажа входных цепей предварительного усилителя, на входе которого установлен переменный резистор. Все экранированные провода помещены в изо-

лирующие хлорвиниловые трубки. Аналогично выполняется монтаж и в квадрафоническом усилителе, где на входе установлен ступенчатый регулятор уровня на базе галетного переключателя 11П4Н.

При монтаже элементов на печатных платах лучше всего использовать электропаяльник мощностью не более 30 Вт и припой типа ПОС-61. Это послужит средством защиты от перегрева и выхода из строя элементов во время монтажа, а также отслоения фольги от основы платы. Особые предосторожности должны соблюдаться при монтаже полевых транзисторов. В этом случае рекомендуется соединять корпус паяльника с нулевым проводом схемы, а на руку, выполняющего монтаж, надевать заземленный металлический браслет.

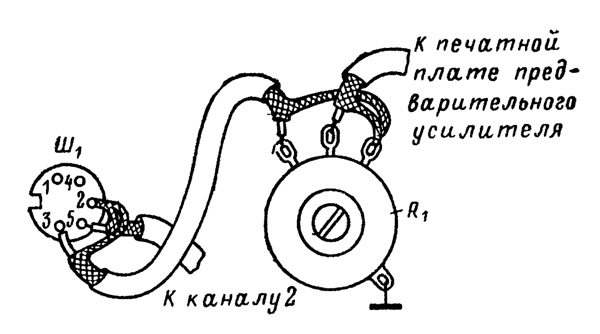


Рис. 51. Пример выполнения монтажа входных цепей предварительного усилителя.

Размещение отдельных элементов и узлов в усилителе должно выполняться так, чтобы при необходимости можно было заменить вышедшую из строя деталь, не разбирая при этом весь усилитель. Соединительные провода лучше всего связать в жгуты и прикрепить с помощью хомутов к основанию.

Дополнительные устройства могут размещаться в одном корпусе с усилителем или выполняться в виде отдельных блоков. В первом случае на переднюю панель необходимо вынести органы управления этими устройствами. Во втором случае при конструировании усилителя должны предусматриваться разъемы для подключения этих дополнительных устройств. При выполнении усилителя в виде отдельных блоков для питания может использоваться самостоятельный источник. Так как потребляемые всеми дополнительными устройствами мощность и ток малы, то для их питания можно использовать транзисторный стабилизатор напряжения, используемый для каскадов предварительного усилителя (см. рис. 43).

Монтаж эмиттерного повторителя для подключения пьезоэлектрического звукоснимателя (см. рис. 18, *а*) ведется на печатной плате, подобной плате усилительного каскада (см. рис. 50). Для стереофонического усилителя входные устройства монтируют на аналогичной плате и размещают в экране в непосредственной близости от звукоснимателя.

Смонтированный предварительный усилитель воспроизведения магнитофона (см. рис. 24) с целью уменьшения наводок тоже поме-

щается в экран из алюминия или тонкого мягкого железа. Соединение усилителя с магнитной головкой лучше проводить двухжильным экранированным проводом, причем экран и один из выводов должны заземляться у входного транзистора. Кроме того, экран необходимо поместить в изоляционную хлорвиниловую трубку. Питание обоих устройств обычно осуществляют от транзисторного стабилизированного источника, находящегося соответственно в магнитофоне или электропроигрывателе.

Дифференциальный каскад (см. рис. 29) для получения псевдоквадрафонического звучания рациональнее разместить в общем корпусе усилителя, смонтировав его на отдельной печатной плате

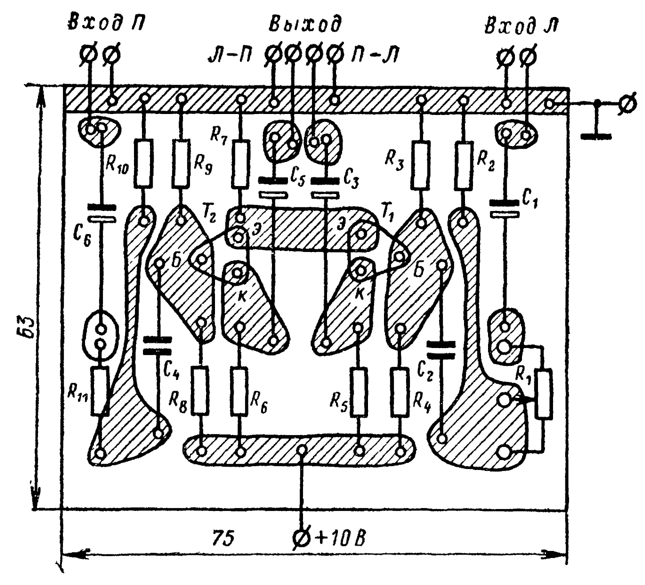


Рис. 52. Печатная плата дифференциального каскада.

(рис. 52), которую закрепляют в вертикальном положении около переменных резисторов стереобаланса (см. рис. 45). При изготовлении этого каскада использовались резисторы типа МЛТ-0,5, МЛТ-0,25, конденсаторы типа МБМ, электролитические конденсаторы К50-3 и переменный резистор типа СП3-1б.

Многоканальные регуляторы тембра и шумопонижающие устройства рациональнее изготовить в виде отдельных самостоятельных устройств. При наличии опыта радиолюбитель сможет самостоятельно разработать печатную плату и изготовить ее.

Приведенные конструкции усилителей характеризуются тем, что вся электрическая часть смонтирована полностью на общем основании. Следовательно, в этом случае корпус усилителя в основном выполняет декоративные функции. Так как в любительских усло-

виях трудно качественно нанести надписи на переднюю панель, то лучше заменить их символами согласно ГОСТ 16707-71.

Корпус усилителя можно изготовить из тонких досок или многослойной фанеры. Отдельные части соединяют с помощью клея и брусков или небольших алюминиевых уголков. Снаружи корпус фанируют под ценные породы деревьев. Поверхность затем зачищают и покрывают лаком [10]. Однако внешнюю отделку можно значительно упростить, если обклеить корпус декоративной пленкой.

Описание конкретных конструкций усилителей приведено без рабочих чертежей. Это вызвано тем, что в любительских условиях не рационально точное повторение размеров всех деталей. Поэтому в описании основное внимание уделяется определению параметров, по которым их следует изготовлять или приобретать готовыми. Совершенно очевидно, например, что использование радиатора с большей поверхностью охлаждения не ухудшит работы устройства, а приведет только к некоторому увеличению его габаритов.

Имея конкретные детали и образец размещения блоков и деталей усилителя (общего монтажа) в виде схем, каждый радиолюбитель сможет самостоятельно собрать свой усилитель. Если в дальнейшем конструктор рассчитывает модернизировать и совершенствовать усилитель, то рекомендуется на общей плате (основании) оставить свободное место (см. рис. 45).

НАЛАЖИВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ

Настройка собранного усилителя является ответственной операцией, от правильности выполнения которой во многом зависит успешное завершение работ по созданию высококачественного усилителя. Радиолюбителю следует учитывать, что он не всегда сможет использовать для настройки современные высококачественные приборы. Кроме того, в большинстве случаев радиолюбитель создает свою установку, используя готовые разработки. Очевидно, в этом случае следует отдать предпочтение тем схемам, которые обеспечивают указанные параметры при минимуме операций по настройке и притом доступными контрольно-измерительными приборами. Для настройки рекомендуемых конструкций достаточно иметь следующие приборы: ампервольтомметр; милливольтметр, позволяющий измерять переменные напряжения частотой от 20 Гц до 20 кГц (например, типа В3-6, В3-39); звуковой генератор (типа Г3-34, Г3-35); осциллограф.

В настоящее время в радиолюбительской литературе имеется достаточно рекомендаций по правилам настройки отдельных блоков транзисторных усилителей низкой частоты. Поэтому в настоящей книге основное внимание уделяется особенностям настройки рассмотренных конструкций усилителей. Так как в предложенных схемах усилителей НЧ заложен блочный принцип построения различных каскадов, то это позволяет проводить настройку любого из них независимо от других.

Настройку устройства начинают с блока питания. Правильно собранный блок питания (см. рис. 39) требует только установки равных напряжений относительно общего провода. Подбором сопротивления резистора R_5 устанавливают напряжение на выходе равным — 18+0,5 В. Затем с помощью переменного резистора R_8 добиваются равного ему напряжения, но с противоположным знаком. Настройку блока питания лучше производить, подключив в качестве

нагрузки резистор сопротивлением 100—120 Ом и мощностью не менее 25 Вт. На этом наладку блока питания можно считать оконченной; требуется только проверить напряжения на выходе стабилизаторов питания каскадов предварительного усилителя (см. рис. 43).

Все операции по настройке блока питания и особенно оконечных усилителей должны проводиться при включенных в цепи питания предохранителях.

Настройка оконечного усилителя. Настройку усилителя начинают с установки режимов транзисторов по постоянному току, используя миллиамперметр и вольтметр. Для этого вместо резисторов R_{12} и R_{10} (см. рис. 9) подпаивают переменные резисторы сопротивлением соответственно 500—700 Ом и 1,5—3 кОм. Первый резистор закорачивают, а второй устанавливают на сопротивление около 1 кОм. К выходу усилителя подсоединяют эквивалент нагрузки, т. е. постоянный резистор мощностью 10—15 Вт; имеющий такое же сопротивление постоянному току, что и звуковая колонка. Затем устанавливают резистор R_9 сопротивлением 33 кОм. После этого усилитель подключают к блоку питания. С помощью вольтметра постоянного тока измеряют напряжение между коллекторами транзисторов T_3 и T_4. Если это напряжение находится в пределах 2,5—3,5 В, то резистор R_9 оставляют. Если же измеренное напряжение меньше указанного, то следует взять резистор с большим сопротивлением (например, 43 кОм), а если больше указанного, то необходимо уменьшить сопротивление резистора. Все замены и перепайки можно проводить только при отключенном питании! После этой регулировки последовательно с резистором нагрузки включают миллиамперметр; предел измерения устанавливают максимальным (например, 500 мА). Изменением сопротивления переменного резистора, включенного вместо R_{10}, добиваются отсутствия тока через нагрузку. Для точной настройки миллиамперметр переключают на другие пределы измерения (например, 50 и 5 мА). После этого отключают питание, а миллиамперметр устанавливают в одной из цепей питания усилителя и с помощью переменного резистора R_{12} устанавливают ток покоя равным 40—50 мА. Такой метод установки тока покоя выходных транзисторов является приближенным.

Для точной установки тока покоя необходим звуковой генератор и осциллограф. Установку тока покоя производят следующим образом. Осциллограф подключают параллельно нагрузке, а на вход усилителя от звукового генератора подают сигнал напряжением 10—20 мВ и частотой 1000 Гц. Изменяя сопротивление резистора R_{12}, добиваются отсутствия искажения типа «ступеньки». Во время этой операции обязательно нужно контролировать с помощью миллиамперметра ток, потребляемый усилителем. Затем питание выключают, отпаивают переменные резисторы, подбирают постоянные с таким же сопротивлением и впаивают их. После этого снова контролируют ток через нагрузку и ток покоя усилителя. Следует заметить, что если параметры выходных транзисторов, используемых в усилителе, значительно отличаются, то может потребоваться дополнительная подстройка усилителя, целью которой является получение равномерного ограничения выходного сигнала. Для этого резистор R_{10} заменяют переменным, к выходу подключают осциллограф, а на вход подают сигнал от звукового генератора. Увеличивая входной сигнал, наблюдают на экране осциллографа момент наступления ограничения выходного сигнала. Если ограничение наступает не одновременно, то изменяют сопротивление резистора R_{10}.

При этом постоянный ток через нагрузку не должен превышать 20—30 мА. В противном случае необходимо подобрать другую пару выходных транзисторов.

После выполнения всех этих операций настройку оконечного усилителя можно считать оконченной. Далее проверяют работу усилителя при максимальной нагрузке. Для этого от звукового генератора на вход оконечного усилителя подаются сигнал (около 350 мВ), при котором на эквиваленте нагрузки будет напряжение, соответствующее выходной мощности 10—12 Вт. Радиаторы выходных транзисторов не должны перегреваться при работе в течение часа. Затем усилитель оставляют включенным на 10—12 ч при закороченном входе: при этом транзисторы не должны нагреваться. На этом проверку оконечного усилителя можно считать оконченной.

Настройка предварительного усилителя (см. рис. 22). Настройку можно условно разделить на два этапа. Первый — установка рабочих режимов усилительных каскадов и второй — настройка темброблока. Для выполнения этих операций необходимо иметь звуковой генератор, осциллограф и вольтметр переменного тока. Настройку лучше всего проводить для каждого каскада отдельно. Для этого достаточно отпаять один из выводов электролитического конденсатора C_2 (при настройке первого каскада) и C_7 (второго). Все цепи питания обязательно должны быть подключены. Затем ко входу предварительного усилителя (транзистор T_1) подключают звуковой генератор, а к выходу — осциллограф. Резистор R_1 заменяют переменным сопротивлением не менее 3,0 МОм и наблюдают на экране осциллографа форму выходного сигнала частотой 1000 Гц. Постепенно увеличивая амплитуду входного сигнала, добиваются его ограничения на выходе. Если ограничение выходного сигнала происходит одновременно, то усилительный каскад настроен правильно. Если же ограничение наступает не одновременно, то изменением сопротивления переменного резистора, включенного вместо R_1, добиваются симметрии выходного сигнала. Если после настройки сопротивление резистора R_1 оказалось больше 2 МОм, то настройку считают законченной. Если же сопротивление резистора R_1 меньше 2 МОм, то это соответствует входному сопротивлению каскада меньше 200 кОм и необходимо подобрать транзистор T_1 с большим $B_{ст}$.

Аналогичные операции выполняются и при настройке второго каскада (см. рис. 22), выполненного на транзисторах T_3, T_4. Входное сопротивление этого каскада обеспечивается равным 60—100 кОм при сопротивлении резистора R_9, равном 700—1000 кОм.

Наладка мостовых схем регуляторов тембра (см. рис. 22). Для этой операции предварительный усилитель должен быть полностью собран, настроен и подсоединены переменные резисторы регуляторов тембра. К выходу усилителя подключают осциллограф для контроля выходного сигнала и вольтметр переменного тока, к входу — звуковой генератор. Включают питание усилителя и снимают его частотную характеристику при положениях регуляторов тембра, соответствующих линейной выходной характеристике. Для этого на вход подают сигнал частотой 1000 Гц и амплитудой 20—30 мВ и измеряют напряжение на выходе. По экрану осциллографа проверяют отсутствие искажений. Затем уменьшают частоту входного сигнала до 100 Гц и регулятором тембра НЧ R_5 добиваются равного выходного сигнала. Далее те же операции повторяют на частоте 10 кГц (или 15 кГц) и регулятором тембра ВЧ устанавливают оди-

наковую амплитуду выходного сигнала. После этого еще раз проверяют амплитуду сигнала на выходе частотой 1000 Гц и, если необходимо, производят регулировку для получения равных значений выходных сигналов на этих частотах. После этого снимают частотную характеристику предварительного усилителя.

Для этого на вход усилителя от звукового генератора подают сигналы разных частот с постоянным уровнем, например 30 мВ. Согласно ГОСТ 7893-72 этот ряд образуют частоты: 10; 20; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 3150; 4000; 5000; 6500; 8000; 10 000; 12 500; 16 000; 20 000 Гц. С помощью вольтметра переменного тока измеряют напряжение сигнала на выходе предварительного усилителя. На основании полученных данных строится зависимость уровня выходного сигнала от частоты. Если отклонения от среднего значения превышают ±3 дБ, то необходимо провести дополнительную регулировку. Все неравномерности частотной характеристики усилителя относятся только к блоку регулировки тембра, так как усилительные каскады имеют практически линейную частотную характеристику в диапазоне частот 10—100 000 Гц.

Изменением емкости конденсатора C_3 добиваются линейной частотной характеристики в низкочастотной области (ниже 1000 Гц), а подбором сопротивления резистора R_7 устраняют «горбы» в высокочастотной части (4—8 кГц).

Затем проверяются диапазоны регулировки тембра на частотах 50 и 15 000 Гц и, если они меньше ±16 дБ, следует подобрать сопротивление резистора R_6 и емкость конденсатора C_6 (см. рис. 22).

После того как настроены все каскады и блоки, можно проводить окончательный монтаж усилителя и проверку его работы. Никаких регулировочных работ после сборки усилителя проводить не требуется.

При создании квазиквадрафонической установки необходимо настроить дифференциальный каскад (см. рис. 29). Для этого вместо постоянного резистора R_8 устанавливают переменный сопротивлением 300 кОм. Изменяя его сопротивление, добиваются, чтобы значения напряжений на коллекторах транзисторов T_1 и T_2 были одинаковыми. Затем измеряют получившееся сопротивление и подбирают постоянный резистор с таким же значением.

Для балансировки чувствительности каналов их соединяют параллельно и на вход подают сигнал от звукового генератора частотой 1000 Гц и амплитудой 40—50 мВ. С помощью переменного резистора R_1 добиваются, чтобы значения напряжений, измеренные на выходах устройства милливольтметром переменного тока (или на экране осциллографа), были минимальными. После этого нитрокраской фиксируют положение движка переменного резистора R_1.

Методика настройки предварительного усилителя для магнитофона (см. рис. 24) аналогична настройке описанного выше усилителя. В процессе его наладки подбирают сопротивление резистора R_5, при котором выходной сигнал частотой 1000 Гц будет максимальным, а его ограничение произойдет одновременно снизу и сверху. Настройка эмиттерного повторителя, включенного на входе усилителя, не требуется. Проверку его частотной характеристики лучше всего проводить с применением специальной магнитофонной ленты с записью частот [7, 8].

Настройку предварительного усилителя для электромагнитного звукоснимателя (см. рис. 26) проводят подобно усилителю воспро-

изведения магнитофона. В процессе настройки подбирают сопротивление резистора R_3 и проверяют коэффициент усиления этого каскада по напряжению. Если он не обеспечивает необходимой чувствительности (в зависимости от типа применяемого звукоснимателя), то достаточно уменьшить сопротивление резистора R_1 и вновь проверить коэффициет усиления $K_и$. После этого снимают частотную характеристику усилителя. Она должна соответствовать стандартной (ГОСТ 7893-72), проведенной на рис. 25. Если есть отклонения более чем на ± 2 дБ, то необходимо подобрать элементы частотно-зависимой обратной связи.

Настройку остальных устройств, приведенных в предыдущих разделах, выполняют после ознакомления с [1, 4, 17, 18].

После настройки всех узлов усилителя выполняют окончательную сборку и проверку работоспособности при воспроизведении музыкальных программ и тестовых грампластинок, выпускаемых фирмой «Мелодия», например «Измерительная стереофоническая частотная запись на 33 1/3 (для левого и правого каналов) ИЗМ 33СО201-02» (ГОСТ 14761.0-69) и «Демонстрация стереозвучания 33С-01641» (ГОСТ 5289-68).

АКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Качество работы всего звуковоспроизводящего комплекса во многом определяется техническими характеристиками используемых звуковых колонок. Для радиолюбителя существенные затруднения вызываются тем, что невозможно в любительских условиях выполнить весь комплекс необходимых акустических измерений, сопутствующих созданию звуковых колонок. Кроме того, процесс создания корпуса колонок достаточно трудоемок. Поэтому при самостоятельном изготовлении звуковых колонок следует предварительно ознакомиться с существующими промышленными и лучшими любительскими образцами, а также с существующими приближенными методиками их расчета. Определяющей величиной при выборе мощности и числа громкоговорителей является выходная мощность усилителя. Известно, что один громкоговоритель не может качественно воспроизводить весь диапазон звуковых частот Поэтому в настоящее время используют разделительные фильтры, с помощью которых осуществляется разбивка звукового диапазона на отдельные области, и для работы в каждой области используют отдельные громкоговорители. В некоторых конструкциях такие фильтры устанавливают после предварительного усилителя, и тогда оконечные усилители обеспечивают усиление ограниченной зоны звуковых частот. Наиболее часто это низкочастотный (ниже 1000 Гц) и высокочастотный (выше 1000 Гц) усилители. Для построения такой схемы стереофонического усилителя необходимо иметь четыре оконечных усилителя, из которых два низкочастотных и два высокочастотных. Именно эта сложность устройства и является основной причиной, из-за которой такие усилители не получили достаточно широкого распространения.

В любительских установках наиболее часто разделение звуковых частот осуществляют за счет специальных схем включения головок. В зависимости от характеристик головок применяют двух-, трех- и даже четырехполосные системы. При двухполосной системе одна головка (или группа головок) обеспечивает воспроизведение низших и средних звуковых частот, а другая — высоких (более 8 кГц). Наиболее распространенной является трехполосная система. В ней

весь диапазон частот делится на три участка: низкочастотный, среднечастотный и высокочастотный. Устанавливаемые фильтры и схема включения громкоговорителей обеспечивают воспроизведение низкочастотной головкой частот до 500—1000 Гц, среднечастотной от 300—400 Гц до 7—8 кГц, и высокочастотной выше 4—5 кГц. Частоты раздела могут изменяться, но рекомендуется низкочастотную границу устанавливать в пределах 500 Гц, а высокочастотную — 5—8 кГц.

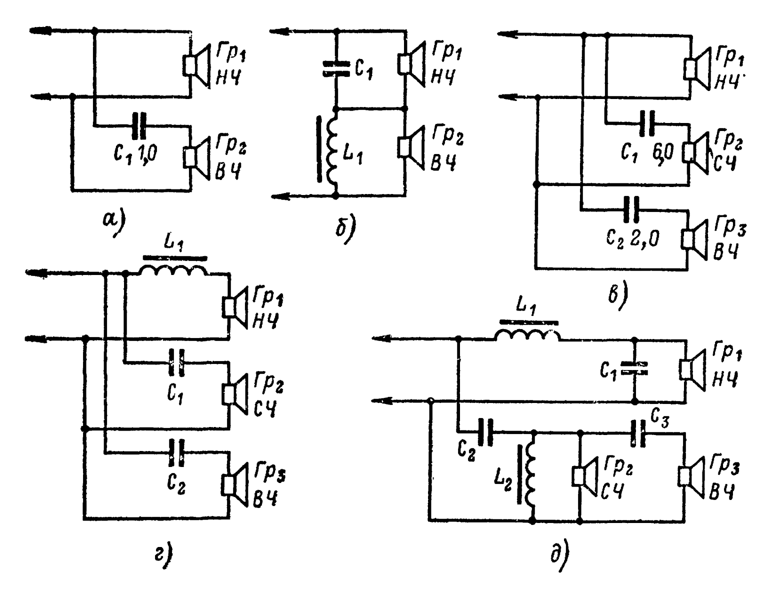


Рис. 53. Схемы подключения динамических головок.

В качестве разделительных фильтров обычно применяют индуктивности (дроссели) и конденсаторы. На рис. 53, *а—д* показаны схемы соединения головок и элементов фильтра, обеспечивающие получение нескольких областей (двух- и трехполосные системы). Значения индуктивностей дросселей и емкостей конденсаторов фильтра зависят от полного сопротивления катушки головки на частоте 1000 Гц. Частоты раздела могут быть рассчитаны по формулам

$$L = 1000 Z_{\text{гр}}/2\pi f, \text{ мГ}; \quad (18)$$

$$C = 160\,000/Z_{\text{гр}} f, \text{ мкФ}, \quad (19)$$

где f — частота раздела, Гц; $Z_{\text{гр}}$ — полное сопротивление громкоговорителя, Ом.

В табл. 7 приведены данные расчета для двух значений $Z_{\text{гр}}$, равных 4 и 15 Ом (для схемы на рис. 53, *б*). Здесь головки включены последовательно, и для блокирования низших звуковых частот высокочастотная головка шунтируется индуктивностью, а низкочастот-

Таблица 7

Граничная частота, Гц	Индуктивность, мГ		Емкость, мкФ	
	4 Ом	15 Ом	4 Ом	15 Ом
500	1,3	4,8	80	21
1000	0,64	2,4	40	10,5
3000	0,26	0,8	13	3,5

ная — емкостью. На рис. 53, *г* показано параллельное соединение головок. Дроссель L_1 препятствует проникновению высших и средних звуковых частот к низкочастотной головке $Гр_1$, а конденсаторы C_1 и C_2 препятствуют прохождению низших звуковых частот к среднечастотной и высокочастотной головкам.

Для четкого разделения областей частот иногда используют и более сложные схемы (рис. 53, *д*).

Если в распоряжении радиолюбителя нет одной мощной головки для воспроизведения, например низших звуковых частот, то она может быть заменена двумя или более меньшей мощности. Соединение этих головок можно осуществлять последовательно или параллельно. Выбор определяется конкретным типом головок и необходимым сопротивлением нагрузки. Эти соображения относятся и к среднечастотным головкам. Для большинства любительских систем, предназначенных для эксплуатации в жилых помещениях, достаточно в качестве высокочастотной применять одну динамическую головку мощностью 1—3 Вт.

Качество работы звуковой колонки зависит не только от типа и количества примененных головок, но также от размеров ее корпуса и места расположения в помещении. Если габариты колонки не ограничены, то следует учитывать, что с увеличением ее объема (при прочих равных условиях) улучшается воспроизведение низших звуковых частот. Если же габариты по каким-либо соображениям ограничиваются, то необходимо использовать другие решения, позволяющие улучшить звучание акустической системы в области низших звуковых частот. Для этого используют закрытые акустические системы, наполняют внутренний объем поролоном или стекловатой, вводят панели акустического сопротивления (ПАС), фазоинвенторы, пассивные громкоговорители, а также электродинамическую обратную связь. Эти методы не охватывают, конечно, всего многообразия существующих методов.

Большое значение имеет также место установки звуковой колонки в жилом помещении. На рис. 54 приведены экспериментальные частотные характеристики одного и того же громкоговорителя, снятые в заглушенной камере или на открытом воздухе (кривая *1*), при расположении его у стены жилой комнаты (кривая *2*) и в углу этой же комнаты (кривая *3*). Как видно из приведенных зависимостей, только за счет изменения места положения громкоговорителя в комнате удается повысить уровень на 4—5 дБ в области низших звуковых частот.

При создании малогабаритных акустических систем удовлетворительных результатов можно достигнуть только в случае установки специальных динамических головок, рассчитанных для работы в таких колонках. Это, например, головки типов 10ГД-30, 6ГД-6, 4ГД-8Е.

Для совместной работы с усилителем (см. рис. 9) предназначалась акустическая система, в каждой колонке которой устанавливалось по пять головок. Электрическая схема ее подключения показана на рис. 55. Сопротивление постоянному току составляет 8 Ом. Включение двух однотипных головок с разными частотами резонанса (63 и 90 Гц) последовательно позволяет получить более равномерную частотную характеристику. В качестве среднечастотных использованы две головки 4ГД-8Е. Емкость конденсатора C_1 рассчитывалась из условия обеспечения частоты раздела (около 500 Гц). Головка 3ГД-31

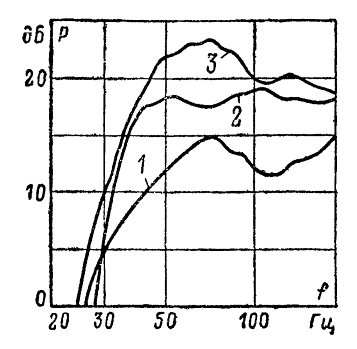


Рис. 54. Частотные характеристики звуковой колонки.

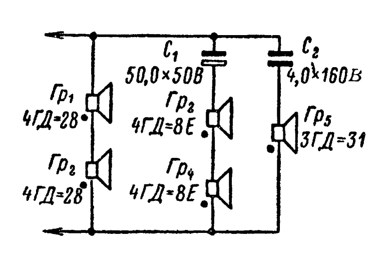


Рис. 55. Схема соединения головок в звуковой колонке.

предназначена для воспроизведения только высших звуковых частот (более 8 кГц), что определяется емкостью конденсатора C_2 (4,0 мкФ). Внешние размеры звуковой колонки 580×370×230 мм. Стенки ее выполнены из многослойной фанеры толщиной 10 мм. На задней съемной стенке колонки выполнено 99 отверстий диаметром 13 мм, закрытых слоем материи (панель ПАС). Способ крепления отдельных элементов конструкции колонки показан из рис. 56. Громкоговорители закрепляют на передней панели (также изготовленной из многослойной фанеры), в которой выполнены отверстия. Спереди устанавливают рамку с отверстиями напротив головок, обтянутую декоративной тканью. Стенки колонки фанируют под ценные породы дерева и затем покрывают лаком [10]. Их также можно обклеить декоративной пленкой.

Площадь отверстия панели ПАС должна составлять не менее 40% площади диффузоров низкочастотных громкоговорителей. Диаметр отверстий выбирают не более 15 мм.

Панель ПАС изготовляют следующим образом. К задней стенке прикрепляют шурупами фанеру. Затем одновременно в них сверлится необходимое количество отверстий. После этого фанеру снимают и все отверстия в задней стенке закрывают полотном. Снова накладывают фанеру и постепенно закрепляют шурупами; при этом обеспечивается натяжение полотна, находящегося между ними. Применение панелей ПАС для звуковых колонок замкнутого типа позволяет не предъявлять жестких требований к качеству обработки внутренних поверхностей и не обклеивать внутренние стенки звукопоглощающими материалами.

При создании стационарной установки звуковые колонки можно изготовить встроенными в стеллажи или стенные шкафы. В этом случае полностью отпадает необходимость в отделке боковых стенок или их изготовлении, если для этого используются стенки шкафа. Для такой конструкции характерно, что передняя панель с громкоговорителями делается съемной. Боковая стойка, полки и одна из стенок образуют корпус колонки. Например, в такой колонке размещены пять динамических головок: две 4ГД-28, две 4ГД-8Е и одна 3ГД-31.

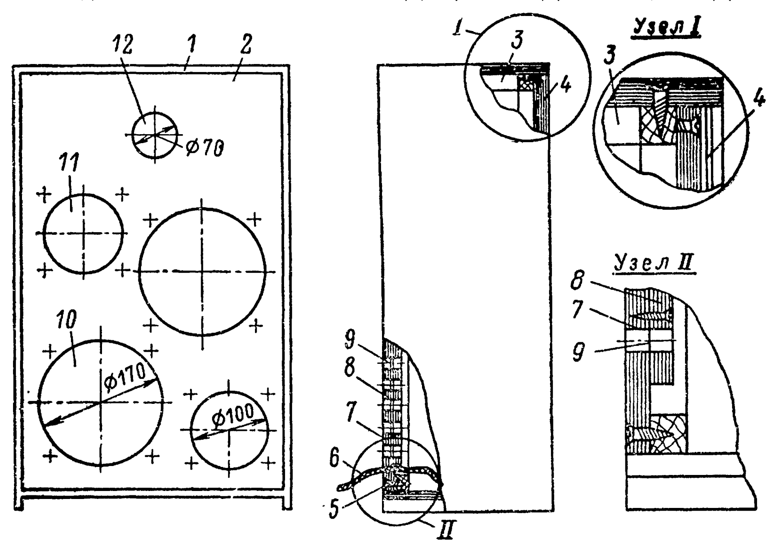


Рис. 56. Устройство звуковой колонки.

1 — боковые стенки; 2 — передняя панель; 3 — крепежные бруски; 4 — декоративная накладка; 5 — крепежные шурупы; 6 — шнур; 7 — задняя стенка с ПАС; 8 — накладка: 9 — ткань; 10 — отверстия под головку 4ГД-28; 11 — отверстия для головки 4ГД-8Е; 12 — отверстис для головки 3ГД-31.

Электрическая схема их подключения аналогична показанной на рис. 55. В нижней стенке колонки выполнено 100 отверстий диаметром 12 мм, образующих панель ПАС. Если выполнение таких отверстий невозможно, то для улучшения равномерности частотной характеристики рекомендуется внутренний объсм заполнить стекловатой или поролоном.

Если не предъявлять высоких требований к качеству воспроизведения низших звуковых частот, то можно изготовить малогабаритные звуковые колонки, в которых установлены две динамических головки, соединенных последовательно. Одна из них типа 4ГД-8Е, а другая эллиптической формы от телевизора «Старт» сопротивлением звуковой катушки 4 Ом. Размеры звуковой колонки 335×155×215 мм. Корпус ее выполнен из досок толщиной 12 мм, склеенных казеиновым клеем. Для соединения стенок между собой используют алюминиевые уголки. Особенность колонки состоит в том, что внутри ее размещается перегородка (рис. 57), имеющая два отверстия диаметром 15 мм,

в которые вставлены отрезки алюминиевых трубок длиной 40 мм. В центре перегородки выполнено возможно больше количество отверстий диаметром 1,0 мм на площади около 4 см². Эта перегородка отделяет объем за головками. Пространство между головками и перегородкой заполнено стекловатой. Два замкнутых объема воздуха, находящиеся позади головок и настроенные на разные частоты (это достигается передвижением перегородки), создают для диффузоров хорошую нагрузку на низших частотах. Оптимальное положение перегородки находится экспериментально по наилучшему звучанию при прослушивании как различных музыкальных программ, так и низкочастотных сигналов от звукового генератора. Для передвижения перегородки установлены две шпильки, проходящие через заднюю стенку. После настройки выступающие части отрезают и эти места заливаются эпоксидным клеем для предотвращения их смещения. Внешнюю поверхность колонки фанируют и покрывают лаком. Диффузоры головок закрывают рамкой с отверстиями, обтянутой декоративной тканью.

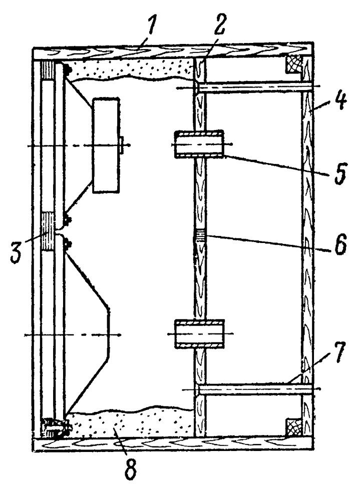


Рис. 57. Устройство малогабаритной акустической колонки.

1 — боковые стенки; 2 — перегородка; 3 — передняя стенка с громкоговорителями; 4 — задняя стенка; 5 — втулка; 6 — отверстия; 7 — направляющие стержни; 8 — стекловата

Для квадрафонической установки не обязательно иметь все акустические системы идентичными. Звуковые колонки первого и третьего каналов, которые являются одновременно левым и правым при стереофоническом варианте, должны быть идентичны и выполнены так же, как и у стереофонического усилителя. Колонки, предназначенные для подключения ко второму и четвертому каналам установки, должны быть одинаковыми, но рассчитываются на меньшую (до половины) мощность и более узкий частотный диапазон за счет низких частот. Это объясняется тем, что задние громкоговорители предназначены для воспроизведения отраженных и высокочастотных сигналов, которые имеют значительно меньшую мощность, чем сигналы, поступающие спереди.

Особое внимание при сборке звуковых колонок уделяется правильной фазировке громкоговорителей. До установки громкоговорителей в корпус необходимо провести маркировку его выводов. Для этого к громкоговорителю подключают батарейку от карманного фонаря и отмечают краской тот вывод, который был соединен с положительным полюсом при движении диффузора внутрь. Если радиолюбитель повторяет готовую схему, то на ней обычно указывается порядок соединения выводов громкоговорителей. В стереофоническом усилителе синфазность включения звуковых колонок легко проверить с помощью тестовой грампластинки «Демонстрация стереозвучания», на которой записан порядок этой проверки.

Правильность включения высокочастотных громкоговорителей проверяют при воспроизведении сигнала частотой 7—8 кГц. На слух на этой частоте настройку проводить нельзя, поэтому надо воспользоваться измерительными приборами. В простейшем случае на расстоянии 1—1,5 м от передней панели звуковой колонки устанавливают микрофон магнитофона; к выходу магнитофона подключают вольтметр переменного тока. По показаниям этого вольтметра определяют, при каком подключении громкоговорителей будет наибольший сигнал. Это и будет синфазное включение. По результатам испытаний первой колонки подключают громкоговорители во второй колонке. При изготовлении проводов, соединяющих звуковую колонку с усилителем, необходимо провести маркировку выводов усилителя, если для подключения не используют стандартные разъемы типа СШ-3 или СШ-5. После настройки и окончательной сборки следует проверить работу звуковой колонки во всем диапазоне частот. Для этого на вход усилителя подается сигнал от звукового генератора, который обеспечивает номинальную (или несколько большую) мощность. При плавном изменении частоты прослушивают работу звуковых колонок. При появлении дребезжания следует выяснить причину и устранить. После этого проверяют работу звуковых колонок при прослушивании различных музыкальных программ

Аналогичные операции по проверке синфазности подключения звуковых колонок проводят и для квадрафонического усилителя. Для этого по очереди сравнивают работу каждого канала с одним и тем же, например первым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Б. Акимов.** Еще раз об электромеханической обратной связи в усилителях НЧ. — «Радио», 1973, № 3.

2. **А. И. Аксенов, Д. Н. Глушков.** Мощные транзисторы в радиоустройствах. М., «Энергия», 1974.

3. **И. Т. Акулиничев.** Усилитель тока низкой частоты. — «Радио», 1974, № 1.

4. **С. Бать, В. Середа.** Высококачественный усилитель НЧ. — «Радио» 1972, № 6,

5. **В. Я. Брускин.** Номограммы для радиолюбителей. М., «Энергия», 1972.

6. **В. Верютин.** Характеристики и применение усилительного каскада с отрицательной обратной связью на транзисторах различной проводимости. М., Изд-во ДОСААФ, 1972.

7. **Г. С. Гендин.** Высококачественное звуковоспроизведение. М., «Энергия», 1970.

8. **Г. С. Гендин.** Советы по конструированию радиолюбительской аппаратуры. М., «Энергия», 1967.

9. **М. Ерофеев.** Повышение стабильности работы бестрансформаторных усилителей мощности. — «Радио», 1971, № 11.

10. **Л. А. Ерлыкин.** Практические советы радиолюбителю. М., Воениздат, 1974.

11. **Л. Кононович.** Квадрофония — путь повышения качества звучания. — «Радио», 1972, № 9.

12. **И. Кудрин.** Устройства шумоподавления в звукозаписи. — «Радио», 1974, № 7, 9.

13. **В. М. Придорогин.** Условия получения минимального коэффициента шума транзисторов при проектировании усилителей низкой частоты. — «Вопросы радиоэлектроники». Общетехническая серия», 1969, вып. 10.
14. **Л. Ривкин.** Расчет регуляторов тембра — «Радио», 1969, № 1.
15. **А. Х. Синельников.** Бестрансформаторные транзисторные усилители низкой частоты. М., «Энергия», 1969.
16. **Справочник** по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам. Под общ. ред. Н. Н. Горюнова. Изд. 3-е. М., «Энергия», 1972.
17. **Д. Стародуб.** Блок регуляторов тембра высококачественного усилителя НЧ. — «Радио», 1974, № 5.
18. **Е. Сухов.** Подавитель шумов в паузах — «Радио», 1974, № 4.
19. **«Popular Electronics»**, 1970, № 10, USA.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Цена 23 коп.